

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

МАТВІЄНКО СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 536.2.081.7: 57.087.1

ДИСЕРТАЦІЯ

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ РЕЧОВИН ЗА ЇХ ТЕПЛОПРОВІДНІСТЮ

Спеціальність: 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу
речовин
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить власні дослідження. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ С.М. Матвієнко

Науковий керівник: Вислоух Сергій Петрович, кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Матвієнко С.М. Вдосконалення методу визначення складу речовин за їх теплопровідністю. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вибору ефективного методу контролю та визначення складу речовин за величиною їх теплофізичних характеристик (ТФХ), вдосконаленню математичної моделі визначення теплопровідності й розробці відповідного приладу з підвищеними метрологічними характеристиками – точністю, вірогідністю та швидкодією.

В дисертаційній роботі задачу контролю складу речовин пропонується розв'язати шляхом визначення їх теплопровідності як основного параметру ТФХ за допомогою методу прямого підігріву термістора, який знаходиться в тепловому контакті з об'єктом контролю, вдосконалення відповідної математичної моделі та розроблення приладу, що їх реалізує, з підвищеними показниками точності, продуктивності та розширеними функціональними можливостями.

В роботі проведено аналіз сучасного стану контролю складу речовин, виконано аналіз методів та існуючих приладів для визначення складу речовин за їх теплофізичними характеристиками. На основі виконаного аналізу встановлено, що ефективним методом розв'язання поставленої задачі є використання прямого розігріву термістора завдяки невеликим розмірам чутливого елементу (термісторного зонду).

Розроблено математичну модель розрахунку теплопровідності речовин за даними термограм розігріву термістора. Розрахункова формула методу, що визначає коефіцієнт теплопровідності речовини, є узагальненою відносною залежністю потужності, яка витрачається на розігрів термістора, від його геометричних розмірів та значень температури розігріву в контрольних точках термограми.

В математичну модель визначення ТФХ досліджуваних речовин введено ряд корегуючих коефіцієнтів, що отримані шляхом проведення вимірювань на еталонних речовинах з відомими ТФХ. Запропонована математична модель на відміну від існуючих, враховує умови розповсюдження теплової енергії від чутливого елемента при вимірюванні температури досліджуваного зразка, зміну потужності термістора в процесі його нагрівання і чутливість термісторного зонду до значення теплопровідності досліджуваної речовини.

Вдосконалено метод контролю складу речовин при визначенні їх теплопровідності на основі використання покращеної математичної моделі та вимірної величини саморозігріву термістора у методі його прямого підігріву.

Для вимірювання ТФХ речовин розроблено дослідний стенд, де в якості чутливого елемента використано термістор, у якого на ділянці падіння напруги вольт-амперної характеристики зменшення опору є більшим в порівнянні зі збільшенням струму його розігріву. На цій ділянці спостерігається ефект саморозігріву термістора електричним струмом, де саморозігрів залежить від ТФХ навколишнього середовища. При цьому ступінь розігріву термістора використовується для визначення теплопровідності речовин.

В результаті аналізу характеристик термісторів, що виготовляються різними виробниками, в дослідному стенді використано термісторний зонд з термістором серії NTC RH16 - 3G202FB компанії «*MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION*», який має негативний температурний коефіцієнт опору.

Наведено структурну схему вимірювального каналу стенду, в одне із плечей мостової схеми якого включено термістор, а сам вимірювальний міст збалансовано при $+40^{\circ}\text{C}$. Це дозволило за числовими значеннями на виході АЦП, що пропорційні напрузі розбалансування моста, отримати термограму для визначення температури розігріву термістора під дією імпульсу струму, а за отриманими даними – теплопровідність досліджуваної речовини.

Розроблено методику визначення складу речовин, що полягає в вимірюванні напруги розбалансування вимірювального мосту, яка є

пропорційною температурі саморозігріву термістора, на основі якої визначається теплопровідність досліджуваної речовини та її склад.

Виконано апробацію запропонованого методу визначення складу речовин зі їх теплопровідністю з застосуванням дослідного стенду, що дало можливість за отриманими результатами його використання створити багатоканальний прилад. Представлено функціональну та електричну схеми розробленого приладу, а також виконано конструктивний його аналіз.

В інтегрованому середовищі *SiLabs IDE* створено програми для мікроконтролерів вимірювального блоку та блоку керування приладом, завдяки яким реалізовано етапи вимірювання теплопровідності речовин.

Засобами пакету *Microsoft Visual C++* розроблено програмне забезпечення системи вимірювання теплопровідності рідин, за допомогою якого здійснюється керування процесом дослідження.

Створено систему аналізу даних вимірювань та визначення характеристик досліджуваних речовин, головне меню інтерфейсного вікна якої складається з семи сторінок. Вибором відповідних сторінок меню та кнопок керування реалізовано необхідну послідовність дій з визначення коефіцієнтів теплопровідності досліджуваних речовин.

Розроблено покрокову методику проведення експериментальних досліджень та створено інструкцію користувача створеного приладу.

Представлено результати вимірювання теплопровідності досліджуваних рідин в діапазоні значень коефіцієнтів теплопровідності від 0,1 Вт/м*К до 1,0 Вт/м*К, що підтвердило можливість використання вдосконаленого методу та розробленого приладу для контролю їх складу на основі визначеної теплопровідності. Наведено результати вимірювання коефіцієнтів теплопровідності різноманітних матеріалів в діапазоні від 0,15 Вт/м*К до 0,7 Вт/м*К, які вказують на можливість використання методу прямого підігріву термістора для вимірювання теплопровідності твердих, умовно твердих та сипучих речовин та їх складу.

Виконано дослідження дестабілізуючих факторів і причин їх виникнення в процесі вимірювання теплопровідності досліджуваних речовин, а також визначено засоби зниження похибки до 1,5%.

Розглянуто можливість застосування вдосконаленого методу контролю складу речовин в біології та медицині та представлено відповідні результати досліджень. Запропонований спосіб визначення наявності та ступеню імунологічної реакції для розчинів біологічних проб полягає в порівнянні значень математичного очікування коефіцієнтів теплопровідності, коефіцієнта асиметрії розподілення значень та середнього статистичного відхилення, що одержаних в результаті аналізу даних контрольних вимірювань та значень даних вимірювання з поправкою на зміну значення математичного очікування коефіцієнтів теплопровідності, викликану властивостями конкретної біологічної проби.

Представлено експериментальну установку для вимірювання ТФХ твердих матеріалів та наведено результати досліджень вимірювання ТФХ твердих матеріалів, що підтвердило можливість застосування вдосконаленого методу прямого підігріву термістора та розробленого експериментального стенду для визначення теплопровідності твердих матеріалів.

В результаті виконання дисертаційних досліджень отримано нове вирішення актуальної науково-технічної задачі, що полягає у вдосконаленні методу контролю складу різноманітних речовин шляхом визначення їх теплопровідності за значенням температури саморозігріву термістора в досліджуваному середовищі. Створено прилад для вимірювання коефіцієнта теплопровідності речовин з використанням методу прямого підігріву термістора при одночасних вимірюваннях багатьох зразків мінімального об'єму, що розширює функціональні можливості методу з похибкою процесу вимірювання теплопровідності речовин, що не перевищує 3%.

Результати дисертаційної роботи пройшли дослідну перевірку та впроваджено в виробництві ТОВ «ВІРКОМ», ПП «УКРТЕХМЕД» та в навчальний процес приладобудівного факультету Національного технічного

університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Ключові слова: неруйнівний контроль, склад речовин, теплопровідність речовин, метод прямого підігріву, термістор, саморозігрів термістора, термограма розігріву, прилад для визначення теплопровідності речовин.

SUMMARY

Matvienko S.M. Improvement method for determining of the substances composition by their thermal conductivity. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for candidate of technical sciences degree (doctor of philosophy) in specialty 05.11.13 - instruments and methods for control and determination of substance composition. – National Technical University of Ukraine " Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2019.

This work is devoted to the choice of an effective method of control and determination of the composition of substances by their thermal physical characteristics (TPC), to improve the mathematical model for determining the thermal conductivity and to develop a suitable instrument with increased metrological characteristics - accuracy, reliability and speed.

In dissertation work the problem for controlling the composition of substances is proposed to be solved by determining their thermal conductivity as the main parameter of the TPC using direct heating thermistor method, which is in thermal contact with the object of control, the improvement of the corresponding mathematical model and the development of the device that implements them, from increased performance, performance and expanded functionality.

In the work was carried out the analysis of the current state for control of the composition of substances, an analysis of methods and existing devices was performed to determine the composition of substances according to their thermophysical characteristics. On the basis of the performed analysis it was established that the effective method of solving the problem is the use of direct heating thermistor method due to the small dimensions of sensitive element (thermistor probe).

Developed adequate mathematical model for calculating the thermal conductivity of substances based on heating thermistor thermogram. The calculated formula for improved method that determines the coefficient of thermal conductivity of substance is power consumed generalized dependence on the heating of thermistor, on its geometric dimensions and on the heating temperature values at the control points of thermogram.

Mathematical model for determining the TPC of the research substances introduces a correction factors number obtained by measuring on reference substances with known TPC. The proposed mathematical model, in contrast to existing ones, takes into account the conditions for propagation of thermal energy from a sensitive element when measuring the temperature of sample under test, changing the thermistor's power during its heating, and the sensitivity of the thermistor probe to the thermal conductivity of the substance being investigated.

The method for controlling the composition of substances is improved in determining their thermal conductivity on the basis of use of an improved mathematical model and the measured value of self-heating thermistor in the method of its direct heating.

To measure TPC substances was developed a test bench, where thermistor was used as a sensitive element, which has a lower resistance in the voltage drop region than the increase in the current of its heating. On this site there is an effect of thermistor self-heating with an electric current, which depends on TPC of the environment. In this case, the thermistor heating degree is used to determine the thermal conductivity of substances.

As a result of the analysis characteristics of thermistors manufactured by different manufacturers, the thermistor probe with thermistor series NTC RH16 - 3G202FB of company «MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION», which has a negative temperature coefficient of resistance, is used in the test stand.

Presented the measuring channel structural scheme, one of the shoulders of which the thermistor is included, and the measuring bridge itself is balanced at +40°C. This allowed for the numerical values at the ADC output, which is proportional to the bridge imbalance voltage, to obtain a thermogram for determining the thermistor heating

temperature under the action of current pulse, and according to the data – the thermal conductivity of the test substance.

Developed the method, which is measure the imbalance of the measuring bridge voltage, which is proportional to the thermistor self-heating temperature, that basis on investigated substance thermal conductivity determined.

The approbation of the proposed method for determining the thermal conductivity of various substances with use of a test stand was carried out, which made it possible, based on the results of its use, to create a multichannel device. The functional and electrical diagrams of the developed device are presented, as well as a constructive analysis of it.

In the integrated environment, created programs for the microcontrollers of the measuring unit and control unit by *SiLabs IDE*, through which the stages of measuring the thermal conductivity of the substances were implemented.

The *Microsoft Visual C++* package has developed a software for measuring the heat conductivity of liquids through which research process is managed.

The system of data measurements analysis and definition of investigated substances characteristics is created, the main menu for interface window consists of seven pages. The choice of corresponding pages of the menu and control buttons implemented the necessary sequence of actions to determine the thermal conductivity coefficients of the substances being studied.

Created step-by-step methodology for conducting experimental research has been developed and a user manual for device.

The results of measuring the thermal conductivity for investigated liquids in the range of values of the thermal conductivity coefficients from 0.1 W/m*K to 1.0 W/m*K, which confirmed the possibility of using the improved method and developed the device to control their composition. The results of measurements of the thermal conductivity coefficients for various materials in the range from 0.15 W/m*K to 0.7 W/m*K to control their composition, indicating the possibility of using the direct heating thermistor method for measuring the thermal conductivity of solid, conditionally solid and loose materials, are given.

The research of destabilizing factors and causes of their occurrence has been performed, as well as means reducing the thermal conductivity of investigated substances to 1,5%.

Considered the possibility of using the proposed method of controlling the composition of substances in biology and medicine, and the corresponding results of researches have been presented. The proposed method for determining the presence and degree of immunological response for biological samples is to compare the values of the mathematical expectation by coefficients of heat conductivity, the coefficient of asymmetry of the distribution of values and the mean statistical deviation obtained from the analysis of the data for control measurements and the values of the measurement data with the correction for the change of value of mathematical expectation of the coefficients thermal conductivity caused by the properties for a specific biological sample.

The experimental setup for measuring TPC of solid materials is presented and the results of researches on measuring solid material TPC are presented, which confirmed the possibility of using the improved thermistor direct heating method and the developed experimental stand to determine the thermal conductivity of solid materials.

As a result of the implementation of the dissertation research, a new solution to the actual scientific and technical problem, which consists in the use of an effective method for controlling the composition of various substances by improving the method for determining their thermal conductivity by the value of self-heating thermistor temperature in the investigated medium and the development of an appropriate mathematical model of the measurement process, has been obtained. A device for measuring the coefficient of thermal conductivity of substances using the direct heating thermistor method with the simultaneous measurement of many samples the minimum volume, which extends the functionality of the method and reduces the error of measuring process the thermal conductivity of substances, does not exceed 3%.

The results of the dissertation work were tested and implemented in the research and production activities of «WIRKOM LLC», private enterprise «UKRTECHMED»

and the educational process of the Instrument-making Engineering Department by National Technical University of Ukraine" Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Key words: non-destructive control, composition of substances, thermal conductivity of substances, method of direct heating, thermistor, self-heating thermistor, thermogram heating, device for determining the thermal conductivity of substances.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Matvienko S., Vysloukh S., Martynchyk O. Determination thermal and physical characteristics of liquids using pulse heating thermistor method. *International Journal of Engineering Research and Science*. 2016. Vol.2, Iss. 5. P.250-258; ISSN №2395-6992. (іноземне видання). Здобувачем досліджено можливість використання методу прямого підігріву термістора для вимірювання ТФХ рідин та твердих матеріалів.

2. Matvienko S., Vysloukh S., Martynchyk O. Increasing accuracy of measuring thermal conductivity of liquids by using the direct heating thermistor method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 4, No.5(82). P. 20-30. DOI : 10.15587/1729-4061.2016.75459. (Scopus). Здобувачем розроблено математичну моделі розповсюдження теплової енергії від термістора при його розігріві та запропоновано функціональну та електричну схеми приладу для вимірювання теплопровідності речовин.

3. Матвієнко С.М., Вислоух С.П Підвищення точності вимірювання теплопровідності рідин методом прямого підігріву термістора. *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*. 2016. № 6. С. 85–93. (DOAJ, Index Copernicus). Здобувачем здійснено аналіз причин виникнення похибки вимірювання та можливості підвищення точності вимірювання ТФХ речовин методом прямого підігріву термістора.

4. Матвієнко С.М., Вислоух С.П., Філоненко К.Г. Вимірювання теплопровідності твердих матеріалів методом прямого підігріву термістора. *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*. 2017. № 2. С. 97–107. (DOAJ, Index Copernicus). Здобувачем розроблено експериментальну установку для вимірювання

теплопровідності твердих матеріалів методом імпульсного розігріву термістора.

5. Матвієнко С. М., Тимчик Г. С., Терещенко М. Ф., Матвієнко А. М. Вплив процесів конвекції в рідині на похибку вимірювання теплопровідності методом прямого підігріву термістора. *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. 2017. № 5. С. 110–122. (DOAJ, Index Copernicus). *Здобувачем досліджено вплив процесів конвекції в досліджуваній речовині на похибку вимірювання теплопровідності методом прямого підігріву термістора та обґрунтовано вибір оптимальної конструкції датчика.*

6. Тимчик Г. С., Вислоух С. П., Матвієнко С. М. Контроль складу речовин за допомогою «методу теплопровідності». *Перспективні технології та прилади*. 2018. № 12. С. 157–163. *Здобувачем підтверджена можливість контролю вмісту неоднорідних речовин, а саме при випаданні осаду або розшиаруванні досліджуваної суміші.*

7. Патент України на винахід №113044, Пристрій та спосіб реєстрації теплових процесів у біологічних пробах / Мартинчук О.А.; Матвієнко С. М.; Вислоух С.П.; Заявник и власник Мартинчук О.А.; Матвієнко С. М.; Вислоух С.П. – опубл. 25.11.2016, Бюл.№ 22/2016. *Здобувачем запропоновано конструктивні особливості приладу для здійснення реєстрації теплових процесів у біологічних пробах та визначення ступеня імунологічної реакції за ТФХ сумішей біологічних проб та алергенів.*

8. Матвієнко С. М., Філіппова М. В., Мартинчук О. А. Дослідження теплопровідності матеріалів за допомогою методу імпульсної термістометрії. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2015. Вип.6(95). С. 106-112. (Index Copernicus). *Здобувачем здійснено аналіз сучасних методів та пристроїв дослідження ТФХ речовин.*

9. Tymchik G., Vysloukh S., Tereshchenko N., Matvienko S. Investigation thermal conductivity of biological materials by direct heating hermistor method. 2018 IEEE 38th International Conference on ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY (ELNANO) (Kyiv, 24.04.2018). Kyiv, 2018. P. 429-434. (Scopus).

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ..... | 16 |
| ВСТУП..... | 19 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ РЕЧОВИН ЗА ЇХ ТЕПЛОПРОВІДНІСТЮ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ..... | 28 |
| 1.1. Вплив складу речовин на їх теплопровідність..... | 28 |
| 1.2 Теплофізичні властивості речовин | 30 |
| 1.3 Актуальність дослідження складу речовин за їх теплофізичними властивостями в різних предметних областях..... | 31 |
| 1.4 Методи контролю та визначення ТФХ речовин..... | 36 |
| 1.5 Засоби контролю та визначення теплофізичних властивостей речовин | 44 |
| 1.6 Сучасний стан застосування методу прямого підігріву термістора для визначення складу речовин за їх ТФХ | 50 |
| Висновки до розділу та постановка задач дисертаційних досліджень.... | 52 |
| РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ СКЛАДУ РЕЧОВИН ЗА ЇХ ТЕПЛОПРОВІДНІСТЮ..... | 55 |
| 2.1 Вибір та обґрунтування методу визначення теплопровідності речовин..... | 55 |
| 2.2 Вибір та обґрунтування чутливого елементу..... | 56 |
| 2.3 Дослідження розповсюдження теплової енергії від чутливого елементу | 63 |
| 2.4 Математична залежність напруги на виході АЦП від температури розігріву термістора | 70 |
| 2.4.1 Структурна схема вимірювального каналу..... | 70 |
| 2.4.2 Залежність потужності, що подається на термістор, від температури його розігріву..... | 71 |
| 2.4.3 Залежність температури розігріву термістора від параметрів вимірювального мосту | 73 |

| | |
|--|-----|
| 2.5 Математична модель визначення теплопровідності речовин за даними термограми..... | 79 |
| 2.6 Визначення корегуючих коефіцієнтів..... | 85 |
| Висновки до розділу..... | 89 |
| РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ РЕЧОВИН ЗА ЇХ ТЕПЛОПРОВІДНІСТЮ ТА ЙОГО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ..... | |
| 3.1 Структурна схема стенду для вимірювання теплопровідності речовин..... | 90 |
| 3.2 Функціональна схема приладу..... | 93 |
| 3.3 Електрична схема приладу..... | 96 |
| 3.4 Опис конструкції приладу..... | 99 |
| 3.4.1 Вимірювальний модуль..... | 100 |
| 3.4.2 Блок керування..... | 103 |
| 3.4.3 Контейнер з досліджуваними зразками..... | 104 |
| 3.4.4 Термостат..... | 105 |
| 3.4.5 Блок живлення приладу..... | 106 |
| 3.5 Математичне і програмне забезпечення системи вимірювання теплопровідності речовин..... | 106 |
| 3.5.1 Алгоритми роботи мікроконтролерів вимірювальних блоків та блоку керування приладом..... | 108 |
| 3.5.2 Програма керування процесом дослідження теплопровідності речовин..... | 109 |
| 3.5.3 Програма аналізу даних вимірювань та визначення характеристик досліджуваних речовин..... | 112 |
| 3.5.4 База даних вимірювань..... | 116 |
| 3.6 Загальна методика проведення досліджень та підготовка зразків досліджуваних речовин..... | 116 |
| 3.7 Застосування приладу для визначення теплопровідності речовин... | 121 |

| | |
|--|-----|
| 3.8 Оцінка адекватності математичної моделі визначення коефіцієнта теплопровідності речовини та обчислення похибки його вимірювання..... | 124 |
| 3.9 Визначення складу речовин за методом прямого підігріву термістора | 128 |
| Висновки до розділу..... | 141 |
| РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБОРУ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ РЕЧОВИН..... | |
| 4.1 Обґрунтування раціональних параметрів досліджень..... | 143 |
| 4.1.1 Аналіз кривих розігріву термістора різних речовин..... | 143 |
| 4.1.2 Вибір режиму нагріву-охолодження термістора..... | 145 |
| 4.1.3 Визначення об'єму досліджуваної речовини..... | 146 |
| 4.2. Визначення корегуючих коефіцієнтів..... | 148 |
| 4.2.1 Вплив температури досліджуваних речовин..... | 148 |
| 4.2.2 Вплив характеристик термістора | 150 |
| 4.3. Похибки, що виникають в процесі вимірювання теплопровідності. | 155 |
| 4.3.1 Причини виникнення похибок та вплив дестабілізуючих факторів..... | 158 |
| 4.3.2 Похибки, що пов'язані з реалізацією методу прямого підігріву термістора..... | 160 |
| 4.3.3 Похибки, що обумовлені процесом обробки результатів вимірювання..... | 160 |
| 4.3.4 Похибки, що пов'язані з помилковими діями оператора..... | 161 |
| 4.3.5 Похибки, що обумовлені конструктивними особливостями вимірювального устаткування..... | 161 |
| 4.4 Похибка каналу вимірювання..... | 167 |
| 4.5 Дестабілізуючі фактори, які впливають на чутливий елемент та зону вимірювання..... | 168 |
| 4.6 Заходи зменшення похибки вимірювання | 170 |
| Висновки до розділу..... | 177 |

| | |
|---|-----|
| РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ ВДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ РЕЧОВИН В РІЗНИХ АГРЕГАТНИХ СТАНАХ..... | 178 |
| 5.1 Області застосування вдосконаленого методу та розробленого приладу..... | 178 |
| 5.2 Визначення імунологічної реакції при аналізі біологічних проб..... | 181 |
| 5.3 Визначення теплопровідності твердих матеріалів..... | 185 |
| Висновки до розділу..... | 192 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ..... | 193 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 196 |
| ДОДАТКИ..... | 213 |
| Додаток А..... | 211 |
| Додаток Б..... | 214 |
| Додаток В..... | 226 |
| Додаток Г..... | 235 |
| Додаток Д..... | 241 |
| Додаток Е..... | 247 |
| Додаток Ж..... | 250 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

Позначення:

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м К);

μ – молекулярна маса газу, кг/кмоль;

c_p – теплоємність речовини при постійному тиску, Дж/кг;

μ – молекулярна маса;

α_0 – емпірична постійна;

R_0 – опір термістора при нормованій температурі, Ом;

B – технологічний коефіцієнт (характеристика термістора), у.о.;

T_Δ – температура розігріву термістора, К;

T – температура навколишнього середовища, К;

T_0 – температура, при якій нормується опір термістора, К;

P_t – потужність, яка подається на термістор, Вт;

T_Δ – температура розігріву термістора, °С;

U_t – напруга на термісторі, В;

I_t – струм, що проходить через термістор, А;

N_{adc} – виміряне числове значення розбалансування вимірювального мосту, у.о.;

U_{adc} – напруга на вході АЦП, В;

$N_{adc\ max}$ – максимальне числове значення на виході АЦП, у.о.;

$U_{adc\ max}$ – максимальна напруга на вході АЦП, В;

U_{cc} – амплітуда напруги імпульсу, В;

K_a – коефіцієнт підсилення підсилювача;

R_{C1} і R_{C2} – опори діляника напруги на виході підсилювача, Ом;

R_m – постійні опори вимірювального мосту, Ом;

U_a – напруга на виході підсилювача, В;

U_m – напруга в діагоналі вимірювального мосту, В;

U_t – напруга на термісторі, В;

T_{25} – температура, при якій нормується опір термістора R_{25} , 298,15 К;

R_{25} – опір термістора при температурі 298,15 К (характеристика термістора), Ом;

B – технологічний коефіцієнт, що залежить від технології виготовлення термістора (характеристика термістора).

T_o – мінімальна температура діапазону вимірювання приладу, °C;

k – коефіцієнт пропорційності;

r – радіус голівки термістора, м;

t – температура, °C;

ρ – густина досліджуваної речовини, кг/м³;

C – питома теплоємність Дж/кг* К;

ΔT_e – температура розігріву термістора, що вимірюється приладом, °C;

$\lambda_{o.p.}$ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваної речовини, Вт/м*К;

ΔN_λ – середнє значення розбалансування вимірювального мосту на виході

АЦП, у.о.;

a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;

Скорочення:

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

АРП – автоматичний реєструючий пристрій;

Б – буфер;

БЖ – блок живлення;

БК – блок керування;

ВБ – вимірювальний блок;

ВЗ – вимірювальні зонди;

ВМ – вимірювальний модуль;

ГНЧ – генератор низької частоти;

ДБЖ – джерело безперебійного живлення;

ДД – драйвер двигуна;

ДП – диференційний підсилювач;

ДТ – датчик температури;

І – індикатор;

КР – контейнер;

М – мікроконтролер;

МР – мультиплексор;

НЕ – нагрівальний елемент;

ПДПК – порт датчиків положення контейнера;

ПК – персональний комп'ютер;

ППН – попередній підсилювач напруги;

РКІ – рідкокристалічний індикатор;

РН – регулятор напруги;

Т – термостат;

НК – неруйнівний контроль;

ТНК – тепловий неруйнівний контроль;

ТФХ – теплофізичні характеристики;

ЧЕ – чутливий елемент;

EOS – джерела перешкоди;

NTC – термістор з негативним температурним коефіцієнтом опору;

PTC – термістор з позитивним коефіцієнтом.

ВСТУП

Актуальною задачею науки, техніки та промисловості є контроль та визначення складу речовин в процесі виготовлення та використання, а також при створенні речовин з заданими властивостями для їх використання в різноманітних сферах виробництва.

Одними з основних характеристик, що визначають властивості речовин і матеріалів є їх теплофізичні характеристики. На їх величину суттєво впливає склад та концентрація його компонентів в речовині в процесі її використання.

При визначенні теплофізичних характеристик (ТФХ) речовин на їх значення суттєво впливає наявність в них домішок, що за різних режимів роботи теплотехнічного обладнання може призводити до значного зниження надійності експлуатації та можливої відмови техніки. В той же час питання зміни складу та властивостей різних речовин під час перебігу теплотехнічних процесів залишається недостатньо дослідженим. Тому визначення складу досліджуваних речовин за їх ТФХ є актуальним завданням, оскільки за величиною зміни основних ТФХ речовини можна визначати наявність домішок в ній навіть за їх незначної концентрації.

Це питання є актуальним для різних галузей, наприклад в харчовій промисловості для виконання інженерних розрахунків, що пов'язані з роботою холодильного обладнання, з метою визначення оптимальних режимів заморожування та висушування харчових продуктів необхідні достовірні дані про їх склад, що визначаються величиною їх ТФХ. Це зумовлено необхідністю вибору оптимального режиму зберігання харчових продуктів, адже недостовірні дані про їх ТФХ в таких випадках призводять до зниження їх якості та суттєвого зменшення терміну зберігання.

Важливими є дослідження складу біологічних матеріалів за їх ТФХ в біології та медицині, оскільки за цими параметрами визначається наявність та ступінь імунологічної реакції на алерген у пацієнтів. Значення теплопровідності суміші «кров+алерген», що визначені з необхідною точністю, дозволяє підвищити

вірогідність встановлення діагнозу захворювання і, як наслідок, підвищити ефективність подальшого лікування пацієнта. Проте проведення таких досліджень ускладнено тим, що в них використовується обмежений об'єм досліджуваного матеріалу з огляду на велику кількість алергенів.

На сьогодні перспективним є впровадження нових теплоносіїв з більш покращеними теплофізичними властивостями, в якості яких застосовують нанорідини (колоїдні розчини твердих наночастинок в базовій рідині). Для забезпечення повторюваності багатоетапного і складного технологічного процесу створення нанорідин та адекватного оцінювання перебігу дослідження необхідний постійний контроль їх ТФХ на кожному з етапів цього процесу. Відсутність поетапного контролю унеможливорює якісну оцінку технологічного циклу створення нанорідин і, як наслідок, не дає змоги відтворити нанорідини з заданими властивостями.

Для контролю та визначення складу речовин за теплофізичними характеристиками важливим факторами є вірогідність і точність їх визначення. У випадках, коли досліджувана речовина неоднорідна, а її об'єм обмежений, в процесі контролю та визначення ТФХ нагрівання речовини здійснюють джерелом тепла малих розмірів. Це ускладнює діагностування речовин за їх ТФХ внаслідок відсутності однозначної теорії, що описувала б теплові процеси та явища, які відбуваються на мікротепловому рівні, та її експериментального підтвердження.

Проблеми дослідження складу речовин за їх ТФХ розглядались в роботах Бурової З.А., Шангіна В.В., Шмелькова Д.А., Скрипова П.В., Декуші Л.В., Дівіна А.Г., Старостіна А.А., Воробйова Л.Й., Варгафтика В.П., Тагоєва С.А., Сіманкової Д.С., Коротких А.Г., Ліпаєва А.А., Івлієва А.Д., Кісліцина А.А., Пономарьова Д.В., Жарова А.В., Акуленка Д.В., Шимчука М.О., Кубікара Л. (Kubičár L.), Багеля Л. (Bágel L.), Вретенара В. (Vretenár V.), Стофаніка В. (Štofanič V.), Джонатана В. Вальвано (Jonathan W. Valvano), Андерсона Г.Т. (Anderson G.T.), Аркіна Г. (Arkin H.), Мартена Ф. ван-Гелдера (Maarten F. van Gelder), Гонзалез-Мендізабала Д.П. (Gonzalez-Mendizabal D.P.) та ін.

Аналіз літературних джерел показав, що для контролю складу речовин за їх ТФХ застосовують різноманітні математичні моделі визначення теплопровідності, які не в повній мірі враховують всі складові процесу теплообміну, що не дозволяє отримати достовірні результати вимірювання їх ТФХ.

Існуючі прилади для контролю та вимірювання складу речовин не забезпечують проведення досліджень з високою точністю. В багатьох випадках величина похибки вимірювань не задовольняє вимогам до проведення теплофізичних досліджень речовин. Переважна більшість приладів здійснює вимірювання ТФХ тільки одного досліджуваного зразка за сеанс, що ускладнює процес накопичення та опрацювання експериментальних даних з метою отримання достовірних результатів досліджень. Це суттєво збільшує час проведення вимірювань та ускладнює можливості порівняльного аналізу ТФХ різних речовин.

Незважаючи на велику кількість робіт, що виконано останніми роками, які пов'язані з дослідженнями складу різних речовин за їх ТФХ, задача отримання достовірних експериментальних даних про теплофізичні характеристики різноманітних речовин залишається актуальною.

В дисертаційній роботі задачу контролю складу речовин пропонується розв'язати шляхом визначення їх теплопровідності як основного параметру ТФХ за допомогою методу прямого підігріву термістора, вдосконалення відповідної математичної моделі та розроблення приладу, що їх реалізує.

Актуальність роботи полягає у розв'язанні науково-практичної задачі вдосконалення методу контролю та визначення складу речовин за їх теплопровідністю, а також створенні засобу з підвищеними показниками точності, продуктивності та розширеними функціональними можливостями для реалізації поставленої задачі..

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний

інститут імені Ігоря Сікорського» і пов'язана з пошуком шляхів забезпечення якості та надійності приладів при здійсненні контролю за температурними режимами обробки деталей, згідно з НДР № 2026-п (ДР № 0117U004263) «Прилад вимірювання мікротвердості та шорсткості поверхні деталі в автоматичному режимі на верстатах з ЧПК».

Мета дисертаційної роботи

Мета дисертаційної роботи полягає у вдосконаленні методу контролю складу речовин шляхом визначення їх теплопровідності та створенні засобу з підвищеними показниками точності, продуктивності та розширеними функціональними можливостями, що їх реалізує.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі основні наукові та прикладні **задачі**.

1. Виконати порівняльний аналіз сучасного стану теоретичних та практичних засад контролю складу речовин.
2. Обґрунтувати можливість контролю складу речовин шляхом визначення їх теплопровідності.
3. Розробити математичну модель визначення теплопровідності, що характеризує склад досліджуваної речовини.
4. Розробити багатоканальний прилад для одночасного контролю та вимірювання теплопровідності великої кількості зразків за однакових умов проведення досліджень з підвищеною точністю та продуктивністю.
5. Створити алгоритмічне та програмне забезпечення системи обробки результатів вимірювань.
6. Провести експериментальні дослідження ефективності використання запропонованого методу для визначення та контролю складу речовин на основі вимірювання їх теплопровідності з застосуванням розробленого приладу.
7. Виконати аналіз похибок вимірювання і обґрунтувати шляхи їх зниження та зменшення часу проведення досліджень.
8. Виконати апробацію та впровадження вдосконаленого методу контролю складу речовин за величиною їх теплопровідності.

Об'єктом дослідження є процес визначення та контролю складу речовин.

Предметом дослідження є теплопровідність речовин.

Методи дослідження: методи визначення та контролю складу речовин; теплові методи визначення та контролю ТФХ матеріалів при виборі найкращого для його реалізації; методи теоретичної теплофізики при визначенні теплових процесів в досліджуваному середовищі; методи побудови та проектування електронних вузлів при розробці багатоканального приладу для вимірювання ТФХ речовин та створенні експериментальної установки для вимірювання ТФХ твердих матеріалів; методи теорії ймовірностей та математичної статистики при обробці результатів експериментальних досліджень; методи алгоритмізації та програмування при створенні програмного забезпечення системи визначення теплопровідності речовин.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному.

1. Вдосконалено метод контролю складу речовин шляхом визначення їх теплопровідності на основі вимірювання величини температури саморозігріву термістора в досліджуваному середовищі.

2. Вдосконалено математичну модель визначення теплопровідності речовин шляхом врахування умов розповсюдження теплової енергії від вкритого захисною оболонкою чутливого елемента, що дало можливість отримати результат вимірювання з похибкою не більше 3% при одночасних дослідженнях багатьох зразків мінімально можливого об'єму.

3. Вперше запропоновано спосіб визначення наявності та ступеню імунологічної реакції за відхиленням абсолютних значень теплопровідності суміші крові з алергеном від накопичених середньостатистичних даних, які отримано внаслідок імунологічної реакції.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному.

1. Створено дослідний зразок багатоканального приладу контролю складу речовин шляхом вимірювання їх теплопровідності із загальним часом дослідження не більше 20 хвилин. На створений прилад отримано патент України на винахід за №113044 від 25.11.2016.

2. На основі проведених експериментальних досліджень з використанням багатоканального приладу обґрунтовано шляхи підвищення точності, ймовірності та продуктивності вимірювання коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин та запропоновано алгоритмічні, схемо-технічні та конструктивно-технологічні рекомендації для їх реалізації.

3. Вперше за результатами дослідження теплопровідності суміші крові з алергенами за допомогою розробленого приладу встановлено характер зміни її величини в залежності від концентрації алергенів та температури, що дало змогу реєструвати наявність та ступінь імунологічних реакцій.

4. Вперше запропоновано та обґрунтовано режими роботи та конструкцію чутливих елементів в залежності від їх ТФХ, що дозволило забезпечити ефективний контроль, підвищити продуктивність, знизити похибку вимірювання теплопровідності речовин за одночасного зменшення об'єму досліджуваного зразка.

5. Вперше створено експериментальну установку для практичної перевірки запропонованого методу контролю та визначення якості виробів з цих матеріалів за їх ТФХ та проведено необхідні вимірювання, що дозволяє використовувати її для відповідних досліджень. Результати роботи впроваджені в виробничий процес ТОВ «ВІРКОМ» та ПП «УКРТЕХМЕД».

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати дисертації, що складають сутність роботи і знайшли відображення в пунктах новизни та практичної цінності, отримано автором самостійно, або при його безпосередній участі. Сформульовано завдання досліджень і вибрані методи їх вирішення, а також розроблено алгоритмічні, схемно-технічні та конструктивно-технологічні рішення при створенні дослідного стенду для вимірювання теплопровідності речовин, багатоканального приладу для визначення складу речовин на основі величини коефіцієнтів теплопровідності та експериментальної установки для вимірювання ТФХ твердих матеріалів.

У роботах, що виконані разом з іншими співавторами, автору дисертаційної роботи належить вибір напрямку досліджень та розробка методики їх виконання,

обґрунтування положень, що покладені в основу розроблених методик проведення досліджень із застосуванням створених засобів.

У роботах, що опубліковані у співавторстві, здобувачу належить: аналіз сучасних методів та пристроїв дослідження ТФХ рідин та твердих матеріалів [83, 88]; аналіз та дослідження раціональних методів вимірювання теплопровідності рідин та твердих матеріалів [87, 89]; дослідження можливості використання методу прямого підігріву термістора для вимірювання ТФХ рідин та твердих матеріалів [84, 101, 102, 105, 107, 108] ; розробка алгоритму вимірювання ТФХ рідин та твердих матеріалів методом прямого підігріву термістора [101]; розробка основних вимог до приладів з вимірювання ТФХ різноманітних матеріалів [106]; розробка математичної моделі розповсюдження теплової енергії від термістора при його розігріві [102, 105]; розробка експериментальної установки для вимірювання теплопровідності твердих матеріалів методом імпульсного розігріву термістора [104]; розробка конструкції блоку зондів для вимірювання теплопровідності твердих матеріалів [136]; розробка програмного забезпечення для розрахунку теплопровідності твердих матеріалів за даними термограм розігріву термістора [104, 111]; обґрунтування та розробка математичної моделі розрахунку ТФХ матеріалів за даними термограм розігріву термістора [102, 106]; розробка функціональної моделі багатоканального приладу для вимірювання ТФХ рідин методом прямого підігріву термістора [83, 102]; розробка програмного забезпечення для розрахунку теплопровідності речовин за даними термограм розігріву термісторів багатоканального приладу [83, 102, 111]; створення багатоканального приладу для вимірювання ТФХ речовин методом прямого підігріву термістора [90, 102]; аналіз причин виникнення похибки вимірювання та можливості підвищення точності вимірювання ТФХ речовин методом прямого підігріву термістора [102, 105, 106]; дослідження конструктивних особливостей приладів для вимірювання ТФХ біологічних матеріалів методом прямого підігріву термістора [88, 109, 131]; розробка способу реєстрації теплових процесів у біологічних пробах та способу визначення ступеня імунологічної реакції за ТФХ сумішей біологічних проб та алергенів [95]; аналіз результатів вимірювання

теплопровідності крові та розробка методики її вимірювання [90, 130]; аналіз методів підвищення точності вимірювання коефіцієнта теплопровідності речовин методом прямого підігріву термістора [105]; розробка методики проведення досліджень по вимірюванню ТФХ нанорідин [89]; аналіз даних вимірювання та розробка рекомендацій зі зменшення похибки вимірювання теплопровідності твердих матеріалів [106]; розробка методики проведення досліджень впливу процесів конвекції в рідинах на похибку вимірювання теплопровідності та обробка даних вимірювання [104]; аналіз даних вимірювання та розробка рекомендацій зі зменшення похибки вимірювання теплопровідності крові та її розчинів [90, 130, 138]; розробка конструкції вимірювальних зондів для вимірювання ТФХ різноманітних матеріалів (рідких, твердих, умовно твердих, газів) методом прямого підігріву термістора [106, 137]; вивчення можливості контролю складу речовин за їх теплопровідністю [90, 91]; Також автором проведено необхідні експериментальні дослідження, що знайшли відображення в [83, 84, 90, 91, 101, 102, 105, 106, 108, 111, 130, 131].

Апробація результатів дисертаційного дослідження:

Основні положення та результати дисертаційної роботи апробовані на: VII Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2014», г.Минск, 2014г.; X Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2017», г.Минск, 2017 г.; 8-ой, 9-ой Международной научно - технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения», г.Минск, 2015, 2016 гг.; Науково-технічній конференції «Інформатика, Математика, Автоматика. ІМА :2016», Суми, 2016р.; VIII та X науково-практичній конференції студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування». м. Київ, 2015, 2017 рр.; 14-й, 15-й, 16-й та 17-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Приладобудування: стан і перспективи», м. Київ, 2015, 2016, 2017, 2018 рр., 38th International Conference on ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY (ELNANO), IEEE, Kyiv, Ukraine, 2018.

Результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри виробництва приладів та кафедри наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем приладобудівного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Основні теоретичні та практичні питання визначення складу речовин за їх теплопровідністю використовуються в навчальному процесі кафедри виробництва приладів НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» при проведенні лекційних та практичних занять з дисципліни «Матеріалознавство».

Перелік публікацій за темою дисертаційного дослідження:

За результатами досліджень опубліковано 23 наукові праці, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданнях іноземних держав, 5 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 1 патент України на винахід, 1 патент на корисну модель, 14 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій та 1 стаття в іншому виданні.

Структура дисертаційного дослідження:

Робота складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, додатків і списку використаних джерел зі 139 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 254 сторінки, з яких 170 сторінок основного тексту, містить 87 ілюстрацій, 9 таблиць та 7 додатків на 41 сторінці.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ РЕЧОВИН ЗА ЇХ ТЕПЛОПРОВІДНІСТЮ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Вплив складу речовин на їх теплопровідність

Властивості речовин та їх склад характеризуються різноманітними значеннями фізичних або фізико-хімічних величин, що піддаються вимірюванню [1]. Практичне виконання аналітичних вимірювань базується на використанні взаємозв'язку між складом досліджуваної речовини (концентрацією її компонентів) і величинами, що характеризують його основні параметри.

Вимірювані параметри поділяються на механічні, теплові і кінетичні, електричні та магнітні, оптичні тощо. В найбільш простому випадку аналіз речовини може бути здійснено без руйнування проби, якщо її можна контролювати безпосередньо за вимірюваним параметром.

Прилади для визначення складу речовин на основі їх параметрів використовують насамперед для контролю показників продукції, контролю в ході виробничих процесів складу компонентів речовин в діапазонах як макро-, так і мікроконцентрацій [1]. Зростаючі вимоги до якості матеріалів і готової продукції та раціонального використання сировини неможливе без повного застосування виробничих агрегатів, вдосконалення та розробки нових виробничих процесів і вдосконалення пов'язаних з цими завданнями методів і засобів контролю та управління, а також охорони довкілля. Все це сприяє подальшому вдосконаленню методів визначення складу речовин на основі їх характеристик, в сукупності яких однією із основних є теплопровідність [1].

Відомі численні дослідження про вплив домішок води на властивості промислових мастил як багатокомпонентних сумішей, що значно змінюють їх теплофізичні характеристики. Так вода, що має аномально високі значення ТФХ в порівнянні з іншими рідкими речовинами, здатна навіть в малих концентраціях

значно змінювати термодинаміку робочих процесів в теплоенергетичному обладнанні [2-6].

При дослідженні технологічних властивостей виготовлення та створення полімерних композиційних матеріалів важливим є точне визначення ТФХ кожної складової композиту, оскільки такі дані визначають склад та кінцеві параметри застосування готового виробу. При цьому діапазон робочих температур деталей механізмів з композитних матеріалів можна істотно підвищити за рахунок введення до їх складу наповнювачів з високим коефіцієнтом теплопровідності [7]. За умови збільшення концентрації наповнювача в композиті коефіцієнт теплопровідності речовини буде збільшуватися практично лінійно [7]. За таких умов є важливим визначення теплопровідності складових полімерного композитного матеріалу для підвищення його теплостійких характеристик.

Для контролю складу досліджуваних речовин, що характеризується зміною теплофізичних властивостей малих та неоднорідних об'єктів, використовуються методи з імпульсним локальним тепловим впливом [8]. Зміна у властивостях та складі речовин впливає на параметри, що контролюються, в залежності від вимірюваних величин. Заключна процедура ідентифікації необхідних параметрів теплофізичних властивостей дозволяє охарактеризувати склад досліджуваної речовини на основі співставлення визначених параметрів та параметрів «еталонних» речовин [8].

В [6, 9] представлено значення теплопровідності досліджуваних рідин в залежності від їх складу. Аналіз змісту наведених даних вказує на суттєвий вплив складових елементів рідини та їх концентрації на теплопровідність.

Таким чином, величина теплопровідності речовин є однією з важливих характеристик, за якою можна контролювати склад досліджуваного матеріалу при його виготовленні та використанні.

1.2 Теплофізичні властивості речовин

У природі і техніці процеси розповсюдження теплоти відбуваються одночасно за рахунок теплопровідності, конвекції та теплового випромінювання [10].

Теплопровідність представляє собою процес поширення теплової енергії при безпосередньому зіткненні окремих частинок тіла або речовини, що мають різну температуру.

Під конвекцією теплоти розуміють процес перенесення теплової енергії при переміщенні об'ємів рідини або газу в просторі з області з однією температурою в область з іншою. При цьому перенесення теплоти нерозривно пов'язане з температурою самого середовища.

Конвекція теплоти завжди супроводжується теплопровідністю, тому що при переміщенні рідини або газу неминуче зіткнення окремих частинок, що мають різні температури. Спільний процес конвекції і теплопровідності є конвективним теплообміном.

Теплове випромінювання – це випромінювання, що виникає за рахунок внутрішньої енергії тіла. Інтенсивність випромінювання залежить від температури тіла.

Конвекція та теплове випромінювання вносять похибку при вимірюванні теплопровідності матеріалів. Тому при дослідженнях теплопровідності матеріалів необхідно мінімізувати вплив цих механізмів передачі тепла на точність вимірювання.

Коефіцієнт теплопровідності є фізичним параметром речовини. У загальному випадку коефіцієнт теплопровідності залежить від температури, тиску і стану речовини. У більшості випадків коефіцієнт теплопровідності для різних матеріалів визначається дослідним шляхом. Відомий ряд методів експериментального визначення коефіцієнта теплопровідності [10-12]. Більшість з них ґрунтується на вимірюванні теплового потоку і градієнта температур в заданому матеріалі. Коефіцієнт теплопровідності λ при цьому чисельно дорівнює

кількості тепла q , що проходить за одиницю часу t через одиницю ізотермічної поверхні при температурному градієнті, який дорівнює одиниці.

Механізм поширення тепла в крапельних рідинах можна уявити як перенесення енергії шляхом неупорядкованих теплових коливань. Такі теоретичні уявлення про механізм передачі тепла в рідинах, що описано в [13], було застосовано іншим автором в [14] для опису експериментальних даних з теплопровідності різних рідин. На основі теорії [14] стверджується, що густина рідини з підвищенням температури зменшується, отже можна зробити висновок, що для рідин з постійною молекулярною масою (неасоційовані або слабо асоційовані рідини) з підвищенням температури коефіцієнт теплопровідності повинен зменшуватися [10].

Для багатьох речовин коефіцієнт теплопровідності не є постійним, а залежить від температури T . Ця залежність в певних інтервалах температур апроксимується лінійною функцією [10].

Внаслідок складності механізму перебігу процесів теплообміну в речовинах практичний інтерес представляють їх ТФХ. Достовірні дані про теплофізичні властивості різних речовин необхідні для створення моделей залежностей теплових властивостей від температури у вузькому діапазоні. Це є актуальною задачею для аналізу складу речовин в залежності від їх теплофізичних властивостей при виконанні теплових розрахунків установок для промисловості.

1.3 Актуальність дослідження складу речовин за їх теплофізичними властивостями в різних предметних областях

Сучасна промисловість характеризується створенням нових речовин, використання яких вимагає точного визначення їх складу та властивостей для застосування в різних умовах. Крім того, виготовлення таких речовин потребує постійного їх контролю на відповідність паспортним даним та заданим властивостям, де одними із основних є ТФХ.

При теплових розрахунках холодильної технології, що базуються на класичних законах теплообміну, в якості постійних множників входять теплофізичні характеристики харчових продуктів. Це викликано тим, що їх ТФХ залежать від хімічного складу, будови та термічного стану продукту. За допомогою ТФХ можна оцінювати тривалість холодильних процесів і процесів розігріву, розморожування, сушки продуктів, особливості фазових перетворень, що відбуваються всередині продуктів, і охарактеризувати їх вплив на довготривалість збереження та якість продуктів.

Це пов'язано перш за все з тим, що харчові продукти мають значну мінливість своїх властивостей, яка визначається їх складом, а велика кількість поживних речовин і води створює сприятливе середовище для життєдіяльності і розмноження мікроорганізмів [15].

У зв'язку з постійним поповненням споживчого ринку новими найменуваннями охолоджених і заморожених харчових продуктів рослинного і тваринного походження розроблення технології та обладнання для їх виробництва не можливе без вичерпної інформації про їх склад та властивості, в тому числі ТФХ. Відсутність або використання недостовірних даних ТФХ продуктів ускладнює виконання інженерних розрахунків, а при виконанні проектних робіт – призводить до неточності оцінювання продуктивності технологічного обладнання харчових виробництв, що, в свою чергу, веде до зниження якості продукції [16].

Актуальність застосування методу контролю складу речовин шляхом визначення їх ТФХ в різних предметних областях представлено на рис. 1.1.

Найбільш часто для експериментального визначення ТФХ різних матеріалів користуються методами, що базуються на законі регулярного теплового режиму. При цьому зі зміною температури, навіть в невеликому діапазоні, ТФХ продуктів змінюються за складним законом, що додатково ускладнює розрахунки технологічного обладнання.



Рис. 1.1 Актуальність застосування методу контролю складу речовин за їх ТФХ

Для отримання достовірної інформації ТФХ матеріалів необхідний тривалий цикл їх натурних випробувань і тому, для спрощення, в більшості випадків, використовують аналітичні (розрахункові) методи визначення ТФХ продуктів та застосовують довідкові дані. При цьому не враховується величина ТФХ продуктів при фазових переходах, отримуючи значну похибку їх експериментального визначення. Для адекватного виконання інженерних розрахунків, як зазначають дослідники [15, 16], необхідно мати значення ТФХ продуктів з похибкою, яка не перевищує 4-5 %, що дозволить достовірно визначити оптимальні режими їх охолодження та нагрівання. Це необхідно для вибору оптимального режиму зберігання, замороження та сушіння продуктів.

З огляду на постійну появу нових продуктів, неоднорідність їх хімічного складу і побудови навіть в межах одного товарного найменування найчастіше складно здійснювати тривалий цикл вимірювань для визначення їх ТФХ з високою точністю. Це значно збільшує об'єм та сутність таких вимірювань, які необхідні для визначення темпу охолодження або нагрівання продукції.

Таким чином, створення експрес-методу для визначення складу харчових продуктів ТФХ (соки та їх концентрати, рослинні олії, молочні продукти тощо) дозволить значно збільшити терміни їх зберігання, підвищити якість продукції, що випускається, та забезпечити енергозощадливість обладнання харчової промисловості [15].

Важливими є дослідження складу речовин за їх ТФХ в біології та медицині, де визначається наявність та ступінь імунологічної реакції на алерген у пацієнтів за даними зміни величини теплопровідності суміші «кров+алерген» в процесі короткочасного теплового впливу [17-22]. В таких дослідженнях точність вимірювання ТФХ біологічних матеріалів має вирішальне значення, оскільки достовірність діагностики захворювань визначає ефективність подальшого лікування пацієнта. Точне процентне співвідношення складу суміші «кров+алерген» (кількість в суміші новоутворених агрегатів комплексів внаслідок взаємодії антигена з антитілом) та температура короткочасного теплового впливу на таку суміш має суттєве значення, оскільки за відхиленням значення

теплопровідності досліджуваної суміші від теплопровідності контрольної суміші здійснюється діагностування імунологічної реакції на відповідний алерген. На сьогодні, існуючі методи визначення складу біологічної суміші за їх ТФХ [17-22] не дозволяють достовірно визначити ступінь імунологічної реакції. Це обумовлено тим, що за наявності імунологічної реакції значення теплопровідності біологічної суміші може змінюватися всього на 2-3%, тому значна похибка вимірювання унеможливорює достовірне оцінювання ступеня імунологічної реакції пацієнта.

З огляду на велику кількість алергенів, для визначення складу суміші «кров+алерген» та їх ТФХ існуючими методами необхідний, по-перше, значний об'єм досліджуваних речовин, по-друге, тривалий час для проведення досліджень. Значна тривалість процесу досліджень обмежує можливу кількість досліджуваних сумішей, оскільки теплофізичні характеристики таких сумішей з часом змінюються, що призводить до недостовірності визначення ступеня імунологічної реакції.

Варто також зазначити, що досить важливим є питання отримання достовірних даних складу нанорідин (колоїдних розчинів твердих наночастинок в базовій рідині), основними параметрами яких також є ТФХ. Створення таких наноречовин спрямоване на підвищення ефективності експлуатації енергетичного і холодильного устаткування, оскільки вони мають більш сприятливі теплофізичні властивості ніж інші речовини, що застосовуються в такому обладнанні.

Дослідження нанорідин проводяться в Україні відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України №256 від 04.03.2004 р, що затверджена програмою зупинення провадження і використання озоноруйнуючих речовин на 2004-2030 рр. Результати досліджень властивостей та складу нанорідин [23-31], що опубліковані в останні роки, показують можливість істотної цілеспрямованої зміни їх теплофізичних і теплообмінних характеристик у порівнянні з традиційними робочими речовинами холодильних систем, систем охолодження та систем кондиціонування повітря. На сьогодні дослідження ТФХ нанорідин виконують дослідницькі групи в різних країнах. Результати цих досліджень

різних авторів суттєво відрізняються [23-25]. Дослідники відзначають, що дані одного і того ж експерименту часто не співпадають при повторному вимірюванні. Вимірювання ТФХ нанорідини на кожному етапі їх створення та дослідження необхідно проводити з високою точністю вимірювання для забезпечення адекватної оцінки перебігу процесу дослідження [23-25]. Невиконання вказаних умов унеможливило якісну оцінку технологічного циклу створення нанорідини і, як наслідок, не дає змоги відтворити нанорідину з заданими властивостями.

Застосування вже існуючих охолоджуючих речовин для теплотехнічних систем супроводжується зміною їх складу та властивостей в процесі експлуатації. Ці процеси пояснюються забрудненням таких речовин різноманітними домішками, що призводить до раптового погіршення їх властивостей та можливої відмови роботи обладнання [32]. Це вимагає періодичного контролю складу речовин за їх теплопровідністю.

Оскільки взаємозв'язок зміни складу та термостабільності охолоджуючих речовин в різних умовах експлуатації недостатньо досліджений [32], то нагальною задачею є створення експрес-методу визначення ТФХ таких речовин для застосування в теплоенергетичних системах.

Таком чином, аналіз застосування різноманітних речовин в промисловості та медицині показав, що актуальним питанням є контроль їх складу в процесі виготовлення та використання. При цьому, ефективним є непрямий метод його реалізації шляхом визначення їх теплофізичних характеристик. Суттєвим є те, що нагрів об'єктів та речовин може відбуватись за таких температур, які не призводять до руйнування хімічних сполук або зміни концентрації їх елементів. Оскільки ТФХ речовини, а передусім теплопровідність є одним із таких параметрів, актуальною задачею є розроблення неруйнівного методу та відповідного засобу її визначення.

1.4. Методи контролю та визначення ТФХ речовин

В цілому всі методи контролю об'єктів та матеріалів поділяються на руйнівні та неруйнівні [33]. Руйнівний контроль – сукупність таких методів, що

вимагають відбирання проб або вирізання зразків безпосередньо з матеріалу досліджуваного об'єкту. Тоді об'єкт не підлягає відновленню місць відбирання проб (зразків). До руйнівних видів контролю відносяться:

- лабораторний хімічний аналіз матеріалу об'єкта (вимагає певного обсягу стружки);
- металографія (дослідження структури металу об'єкта шляхом вирізання шліфів);
- лабораторні механічні випробування матеріалу об'єкта на розтяг, стиснення, вигинання, ударну в'язкість (вимагає вирізання спеціальних зразків).

Неруйнівний контроль (НК) – це сукупність таких методів контролю, які здійснюються безпосередньо на об'єкті, при цьому досліджуваний об'єкт зберігає працездатність без будь-якого пошкодження матеріалу [34].

Методи неруйнівного контролю використовуються для виявлення порушення суцільності або однорідності мікро- та макроструктури, відхилень хімічного складу та з іншою метою без необхідності руйнування зразків матеріалу або виробу в цілому.

Також методи неруйнівного контролю використовують при дослідженні теплових процесів в різних об'єктах.

Класифікація методів визначення ТФХ речовин представлена на рис.1.2.

При порушенні термодинамічної рівноваги об'єкту з навколишнім середовищем виникає надлишкове температурне поле, характер якого дозволяє отримати інформацію про властивості об'єкта, що становлять інтерес для досліджень.

Тепловий контроль, згідно міждержавних стандартів з неруйнівного контролю [33, 34], є методом неруйнівного контролю, що базується на реєстрації температурних полів об'єкту та на взаємодії теплового поля досліджуваного об'єкту з термодинамічними чутливими елементами (термопарою, фотоприймачем, рідкокристалічним індикатором тощо), перетворенні параметрів поля (інтенсивності, температурного градієнту, контрасту, яскравості тощо) в електричний сигнал і передачі його на прилад реєстрації.

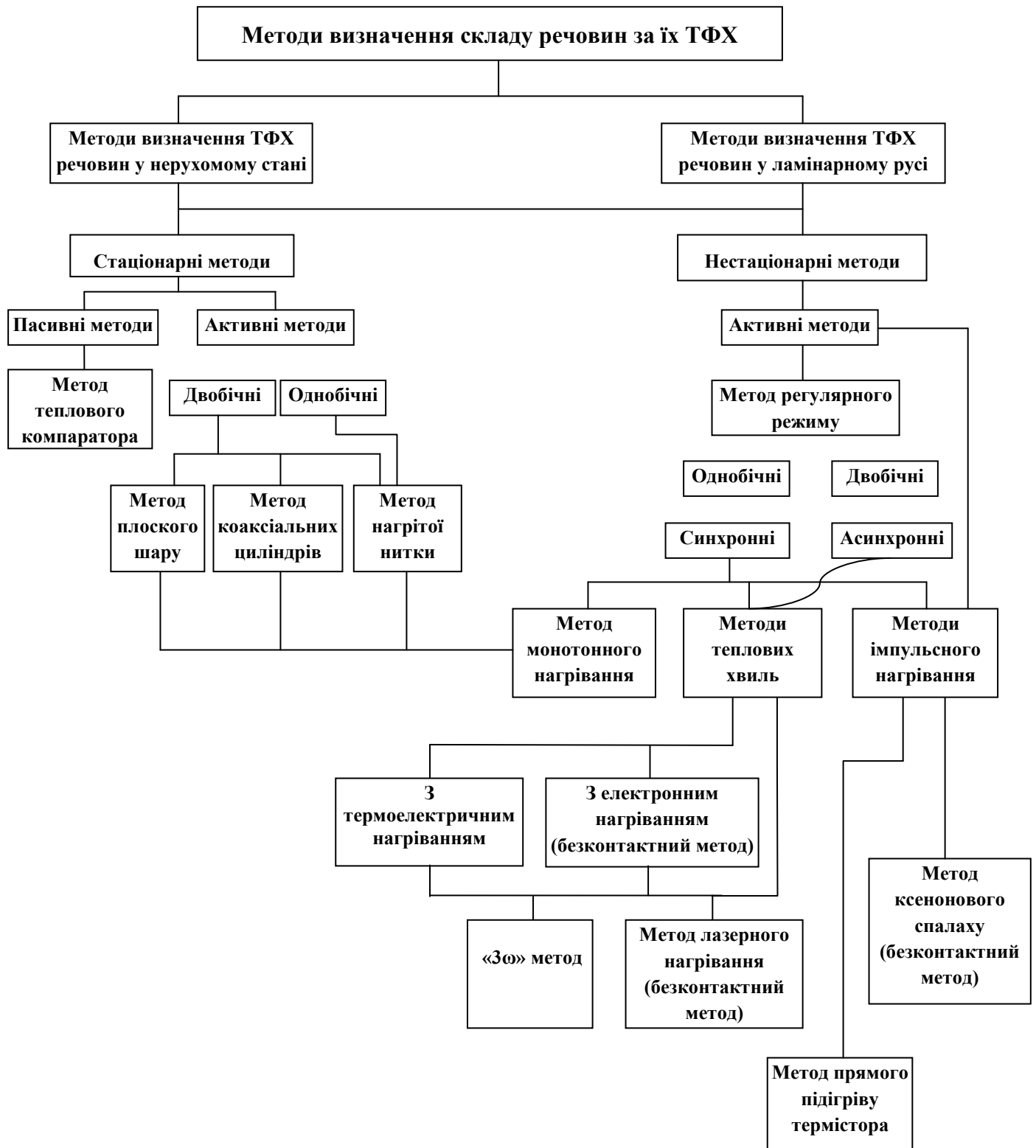


Рис. 1.2. Класифікація методів визначення теплофізичних характеристик речовин.

При цьому параметрами, що реєструються, є теплопровідність, теплоємність, градієнти температур, теплова постійна часу та коефіцієнт випромінювання.

Розрізняють два основних методи теплового неруйнівного контролю (ТНК) – пасивний і активний [34].

Пасивний метод – метод ТНК, при якому об'єкт контролю не піддається дії зовнішнього джерела теплової енергії.

Активний метод – метод ТНК, при якому об'єкт контролю піддається дії зовнішнього джерела теплової енергії.

При проведенні ТНК головну роль відіграють три складових: об'єкт контролю, термочутливий елемент, джерело нагрівання (при необхідності).

За розміщенням об'єкта теплового контролю і термочутливого елемента пасивний ТНК поділяється на односторонній і двосторонній [34].

Активний ТНК за розміщенням одного джерела нагрівання відносно іншого, термочутливого елемента і об'єкту контролю поділяється на односторонній, двосторонній, комбінований, синхронний та асинхронний [34].

Активні методи теплового контролю поділяються на стаціонарні та нестаціонарні [33], а пасивні методи – на контактні та власного випромінювання (безконтактні). Контактний метод теплового контролю – метод ТНК, що базується на реєстрації ТФХ при безпосередньому контакті чутливого елемента з поверхнею об'єкту контролю. Метод власного випромінювання – метод ТНК, що базується на реєстрації ТФХ при відсутності безпосереднього контакту чутливого елемента з поверхнею об'єкта контролю.

Крім того, методи теплового контролю діляться на статичні та динамічні. В цьому випадку визначаючим фактором є залежність ТФХ об'єкту від часу [34].

На сьогодні також використовуються такі перспективні методи ТНК: вібротепловізійний, метод теплової томографії, метод ТНК на основі термофотопружності, тепловий метод контролю вологості, електромагнітнотепловий, радіотепловий, фазова термографія, теплографічний

неруйнівний контроль композитів, фототермоакустичні методи неруйнівного контролю. Вказані методи для дослідження ТФХ речовин не застосовуються.

В залежності від характеру взаємодії чутливого елемента з об'єктом вимірювання розрізняють контактні та безконтактні методи вимірювання ТФХ.

До контактних методів вимірювання ТФХ відносять методи, що побудовані на різних принципах перетворення температури у фізичну величину, яку можна безпосередньо виміряти та за умови теплового контакту між об'єктом вимірювання та чутливим елементом. Основна вимога до контактних методів вимірювання ТФХ – це мінімальна різниця між величиною ТФХ чутливого елемента та ТФХ об'єкта вимірювання.

До групи безконтактних методів вимірювання ТФХ відносять методи, що побудовані на різних принципах перетворення теплового випромінювання у фізичну величину, яку можна безпосередньо виміряти. Тут тепловий контакт між об'єктом вимірювання та чутливим елементом не є обов'язковим. Безконтактні методи вимірювання ТФХ не вимагають тотожності температури чутливого елемента та об'єкта вимірювання.

Дослідження ТФХ рідких речовин методами теплового контролю виконуються в широкому діапазоні температур в нерухомому їх стані або (та) при ламінарному русі.

Стаціонарні методи, що засновані на дослідженні незмінних в часі температурних полів, більш прості в застосуванні та при виконанні розрахунків, ніж нестаціонарні [10, 12].

Нестаціонарні методи базуються на дослідженні мінливих впродовж часу за певним законом температурних полів. Вони більш складні в реалізації. Складність полягає в тому, що при проведенні експерименту важко реалізувати умови, що покладені в основу методу. Однак нестаціонарні методи дозволяють, крім величини теплопровідності, отримати інформацію про температуропровідність і теплоємність речовини [10, 36].

Вимірювання теплопровідності матеріалів стаціонарними та нестаціонарними методами здійснюється за допомогою вимірювальних комірок, в

яких розташовують як нагрівальні, так і чутливі до зміни температури елементи. Конструктивно однакові вимірювальні комірки можуть бути використані при вимірюванні ТФХ різних речовин як стаціонарними методами, так і нестаціонарними.

В залежності від конструкції вимірювальної комірки для вимірювання теплопровідності речовин використовують:

- метод плоского шару;
- метод коаксіальних циліндрів;
- метод нагрітої нитки;
- метод прямого підігріву термістора.

Метод плоского шару є одним з найпоширеніших методів визначення теплопровідності матеріалів [10, 36]. В даному методі досліджуваний зразок розміщується між опорним мідним стрижнем і мідною контактною пластиною. Частина тепла, що надходить через тепловимірювач теплового потоку, витрачається на нагрівання зразка. При цьому температурне поле в зразку і пластині можна вважати лінійним. Особливість реалізації методу для рідин пов'язана з контролем появи конвекції в досліджуваному шарі. Для мінімізації впливу цього ефекту робочі поверхні шарів розташовуються горизонтально, а підведення теплоти до досліджуваного шару здійснюється тільки зверху.

Ще одним поширеним методом визначення теплопровідності речовин є метод коаксіальних циліндрів [10, 36], в якому досліджувана речовина (рідина або газ) заповнює циліндричний проміжок, що утворений двома коаксіально розташованими циліндрами. У внутрішньому циліндрі розміщується основний нагрівач. При цьому шар досліджуваної речовини обмежений внутрішнім і зовнішнім циліндрами, а робоча різниця температур вимірюється термопарами.

На сьогодні одним з основних методів визначення теплопровідності речовин є метод нагрітої нитки [10, 23-31, 36], в якому внутрішній циліндр замінюється нагрітим дротом (ниткою), що є одночасно джерелом теплоти і термометром опору для вимірювання температури. Завдяки цьому вдається

збільшити, в порівнянні з методом коаксіальних циліндрів, відношення довжини нагрівача до його діаметру i , тим самим, зменшити торцеві втрати теплоти.

За умови поширення теплового потоку радіально теплопровідність досліджуваної речовини [10, 36] залежить від довжини дроту, величини струму і падіння напруги на довжині дроту, температури внутрішньої поверхні трубки та відношення зовнішнього діаметра трубки до внутрішнього.

Оскільки конструкція вимірювальної комірки або двох комірок з різною довжиною дротів складні в реалізації, останнім часом знайшли широке поширення розрахункові способи визначення торцевих втрат, що базуються на розв'язанні стаціонарного рівняння теплопровідності для дроту з внутрішнім джерелом теплоти [10, 36]. При цьому на теплопровідність, що виміряна в трубках малого діаметра, помітний вплив може мати ексцентрично розташований дріт відносно трубки.

Нестаціонарні методи за режимом нагрівання досліджуваного зразка поділяються на:

- методи регулярного режиму (методи монотонного нагрівання та методи теплових хвиль);
- методи імпульсного нагрівання.

Сутність методів регулярного теплового режиму полягає в тому, що розглядається процес охолодження (нагрівання) тіла в середовищі з постійною температурою, коли початковий стан тіла практично не впливає на результати вимірювань. На основі теорії регулярного теплового режиму розроблено методи визначення різних теплофізичних характеристик. Так, відомі методи двох і багатьох точок вимірювання, які дозволяють визначати коефіцієнт температуропровідності при порівняно невеликих значеннях коефіцієнта тепловіддачі. Застосування зазначених методів вимагає дотримання геометричної схожості при встановленні термопар в багатьох точках досліджуваного зразка і еталона [37] та є складними в реалізації.

Метод теплових хвиль (періодичного нагріву зразка) полягає в збудженні теплових хвиль одночасно в досліджуваному зразку та в еталонному, вимірюванні їх характеристик в обох зразках та подальшому їх порівнянні [38, 39].

Метод регулярного режиму [40] (метод Ангстрема) використовується для визначення ТФХ металів шляхом вимірювання затримки теплових коливань, що поширюються уздовж металевого стержня між двома точками. Ідея методу Ангстрема покладено в основу більшості методів температурних хвиль.

Проблеми дослідження теплофізичних властивостей матеріалів методом регулярного режиму розглянуті в роботах [41-43]. Даний метод в [41] використовувався в основному для вимірювання комплексу ТФХ газів і рідин при різних умовах. В даний час він став загальнофізичним методом дослідження широкого класу явищ, які виявляють себе, перш за все, в особливостях поведінки теплових властивостей речовин [39]. При термоелектричному нагріванні часто застосовують елемент Пельтьє [44], що є ефективним способом періодичного температурного впливу на зразок.

Методи імпульсного нагрівання досліджуваного зразка відрізняються від методів регулярного режиму тим, що нагрівання здійснюється імпульсом теплової енергії. За способом утворення імпульсу теплової енергії методи імпульсного нагрівання поділяються на:

- метод ксенонового спалаху [45];
- метод лазерного спалаху [45];
- метод прямого підігріву термістора [17-22, 46-61];
- метод нагрітої нитки (нагрівання нитки здійснюється імпульсом електричного струму) [10].

Методи імпульсного нагрівання можуть бути як односторонніми, коли нагрівач та чутливий елемент знаходяться по одну сторону від досліджуваного матеріалу, так і двостороннім – коли нагрівач та чутливий елемент знаходяться по різні сторони від досліджуваного матеріалу. При цьому методи імпульсного нагрівання не вимагають тривалого часу для встановлення теплової рівноваги.

Методи лазерного спалаху (метод лазерного імпульсу) та ксенонового спалаху відносяться до двосторонніх. Недоліком цих методів є підвищені вимоги до умов проведення експерименту.

Метод прямого підігріву термістора є одностороннім методом, а метод нагрітої нитки – використовується як односторонній, так і двосторонній.

Метод прямого підігріву термістора [17-22, 46-61] є подібним методу нагрітої нитки, принцип дії якого описано вище. В обох методах використовується властивість датчика розігріватися під дією струму, який проходить через чутливий елемент, але відрізняється тим, що в першому випадку чутливим елементом є платинова нитка, а в іншому – термістор. Відмінність також полягає в тому, що платинова нитка має лінійну залежність свого опору від температури, що спрощує теплофізичні розрахунки, а термістор – нелінійну. Тому метод нагрітої нитки використовується більш часто, ніж метод прямого підігріву термістора.

Сутність методу прямого підігріву термістора полягає у використанні ділянки вольт-амперної характеристики термістора, де його опір при збільшенні сили струму зменшується (для термісторів з негативним коефіцієнтом залежності опору від температури), а напруга на ньому – падає. На цій ділянці величина падіння опору буде залежати від температури його розігріву, тобто від навколишнього середовища, в якому він знаходиться.

Порівняльний аналіз методів неруйнівного теплового контролю речовин показав, що метод прямого підігріву термістора завдяки конструктивній простоті та мініатюрності датчика дозволяє вимірювати їх ТФХ за мінімального об'єму досліджуваної речовини.

1.5. Засоби контролю та визначення теплофізичних властивостей речовин

Аналіз стану контролю та вимірювання ТФХ різноманітних речовин зумовлює необхідність використання ефективних засобів визначення їх складу в

умовах створення та використання в різноманітних теплоенергетичних та діагностичних системах. Теплофізичні прилади, які випускаються промисловістю, в переважній більшості не передбачають одночасне вимірювання та контроль ТФХ великої кількості різноманітних речовин. Це обмежує можливості їх застосування та суттєво збільшує час проведення досліджень. Навіть існуючі ДСТУ [62, 63] для вимірювання теплопровідності передбачають застосування лабораторних вимірювальних установок, а не промислових приладів.

Засоби, що використовуються для визначення теплопровідності різноманітних речовин, представлено в табл. 1.1 [64-77].

Таблиця 1.1 Перелік промислових та лабораторних приладів, що використовуються для визначення теплопровідності речовин.

| Промислові та лабораторні прилади | Режими вимірювання | | | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|---|---|----------------|---------------------|---------------------|
| | Теплопровідність Вт/(м×К) | Речовини, які досліджуються | Розміри дослідного зразка | Робоча t °С | Тривалість досліджу | Похибка вимірювання |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| ІТС– І–1 | 0,030...10 | Щільні, дрібнодисперсні і повітряно-пористі | Площа 5...100 см ² , товщина 0,5...40 мм | -30...+80 | 3... 30 хв. | 3...7% |
| ІТС– с–2 | 0,040...10 | Тверді неметалічні | Площа 5...100 см ² , товщина 0,5...40 мм | - 30 ...+80 | 3...20 хв. | 3...7% |
| ІТС–Іс–3 | – | Рідини і пастоподібні речовини | Ампула об'ємом ~ 40 см ³ | - 30 ...+80 | 3...10 хв. | 5 ... 7%. |
| ІТС–с–4 | – | Різнноманітні речовини | Зразки об'ємом ~20 см ³ | - 30 ...+20 | 10...40 хв. | 5 ... 7%. |
| ІТС–с–5 | – | Тверді матеріали і рідини | Ампула об'ємом 10...40 см ³ | - 30 ...+80 | 3...10 хв. | 3...5% |
| ІТС–q–6 | – | Хімічно-неактивні речовини | Ампула об'ємом 20...40 см ³ | Кімнатна | | 5 ... 7%. |
| Комплекс приладів ІТС | – | Тверді і рідкі, полімери | Діаметр-20-70мм, товщина-0,5-40мм | - 30 ...+80 | 3...40 хв. | 3...7% |
| Режим 1 | – | Тверді матеріали, рідини, гази | – | - 200 ...+1200 | – | 3% |

| Продовження таблиці 1.1 | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------|---|----------------------------------|-------------------------------|--------|------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| KD2-PRO | – | Тверді, рідини | – | - 50 ...+150 | – | 10% |
| DTC-25 | 0,1 ... 20 | Тверді тіла, рідини, тонкі плівки | Максимальни й розмір 32 мм | Кімнатна | – | ±3% ...±8% |
| DTC-300 | 0,1 ...40 | Тверді тіла, рідини, тонкі плівки | 50 мм | -20°C ...+300 | – | ±3% ±8% |
| LAMBDA | 10 до 2000 мВт | Рідини | – | Кімнатна ...+400 | – | 3% |
| Thermal Constant Analyzer | 0,01... 500 | Тверді, порошкоподібні , композити, рідкі | – | - 45 ...+1000 | 22 хв. | 5 ... 10%. |
| C-Therm TCi | 0 ... 500 | Тверді, рідини, порошкоподібні матеріали, пастоподібні | – | -50... +200 | – | ±3% ...±8% |
| XFA-300 | 0.1.... 2000 | Тверді | 10x10 мм | Від кімнатної до +500°C | – | – |
| LFA 467 HyperFlash | 0,1 ...2000 | Рідини, полімери,смоли, порошкоподібні матеріали | 25,4 мм, 12,7 мм | - 100 ...+500 | – | 3...5% |
| FLASHLINE- 3000/5000 | – | Тверді, рідини, полімерні матеріали | 8 мм... 12 мм | - 180 ...+2700 | – | 3...5% |
| THW-L1 | 0,01 ... 2 | Рідини, пастоподібні матеріали | 15 мл, 50 мл | -30... +400 | | 5% |
| TLS 100 | 0,1 ...5 | Грунт | – | - 40... +100 | – | 5% |
| THB-100 | 0,01 ... 100 | Тверді, рідини, полімерні матеріали | – | - 50... +200 | – | 5% |

Прилад «ІТС-І-1» призначений для вимірювання теплопровідності і теплового опору різноманітних теплоізоляційних, будівельних та конструкційних матеріалів при кімнатній температурі [64].

Прилад «ІТС-с-2» призначений для дослідження теплових і вологісних характеристик тонкодисперсних вологовмісних матеріалів в області температур (-30 +20)°C. Цей прилад може також використовуватись для вивчення теплових властивостей будь-яких речовин і матеріалів, як рідких, так і твердих [64].

Прилад «ІТС-LC-3» призначений для вимірювання теплопровідності і теплоємності речовин при атмосферному тиску в області температур від -30 до + 80°C [64].

Прилад «ІТС-с-4» призначений для дослідження теплових характеристик та характеристик вологості матеріалів в області температур від -30 до +20°C [64]. Тут використовуються зразки об'ємом близько 20 см³. Досліди можуть проводитися в режимах заморожування і розморожування зразка. У дослідженні комплексно визначаються ентальпія, ефективна і істинна теплоємність, диференціальна і інтегральна теплота фазових перетворень, частка вимороженої води, кріоскопічна температура (температура початку замерзання води в зразку). Прилад є настільним, виконаний у вигляді двох блоків – теплового осередку і контролера. Похибка вимірювання приладом не перевищує 5%.

Прилад «ІТС-с-5» призначений для вимірювання теплоємності при атмосферному тиску в області температур від -30 до +80 ° С [64].

Прилад «ІТС-q-6» призначений для вимірювання внутрішніх теплових джерел, що виникають при хімічних реакціях, у процесах розчинення, окислення тощо. Дослідження проводяться в ізотермічній середовищі кімнатної температури. При цьому реєструється тепловий потік, що генерований або поглинається досліджуваною речовиною [64].

Комплекс приладів використовується для вимірювання теплових і вологісних властивостей [64]. Вимірюваними характеристиками даного комплексу приладів є теплопровідність, тепловий опір, температуропровідність, теплоємність, ентальпія, теплота фазових і структурних перетворень, вологовміст, кріоскопічна температура та внутрішні теплові джерела.

Принцип роботи приладу «Режим-1» базується на нестационарному імпульсному іррегулярному режимі нагріву, в основі якого покладено вимірювання опору датчика (переважно платини) на початку і в кінці прямокутного імпульсу [65]. За отриманим значенням обчислюються ТФХ.

Аналізатор теплопровідності «KD2-PRO» є портативним пристроєм, що використовується для вимірювання теплових властивостей речовин [66]. Він

складається з портативного контролера і набору датчиків, які застосовуються в залежності від виду досліджуваного матеріалу та середовища вимірювання.

Принцип роботи аналізатора теплопровідності DTC-25 заснований на тому, що досліджуваний зразок розміщується між двома відполірованими металевими поверхнями [67]. Верхня пластина задає температуру нагрівання зразка. Нижня поверхня є частиною датчика теплового потоку, до якої прикріплений радіатор рідинного охолодження. Для забезпечення відтворюваності вимірювань тепловий опір в місці контакту поверхонь зі зразком підтримується на мінімальному рівні шляхом використання теплопровідних паст. Після досягнення теплової рівноваги датчик теплового потоку реєструє різницю температур. За цією величиною та товщиною зразка прилад автоматично розраховує теплопровідність.

Аналізатор теплопровідності DTC-300 – дослідний прилад з можливістю проведення вимірювань при заданій температурі [68]. Можливе вимірювання теплопровідності тонких плівок у вигляді багат шарових зразків з комп'ютерною корекцією результатів.

Вимірювальна система LAMBDA застосовується для вимірювання теплопровідності рідин, в т.ч. наночастинок [69]. Принцип вимірювання заснований на вимірюванні опору розігрітої нитки з діаметром не менше 100 мкм. При цьому мінімально можливий об'єм досліджуваної рідини складає 45 мл, що ускладнює вимірювання ТФХ неоднорідних речовин. В випадку дослідження нанорідини такий об'єм не забезпечує отримання достовірних даних вимірювання.

Принцип роботи приладу Thermal Constant Analyzer заснований на запатентованій технології (TPS), завдяки якій можливо одночасно визначати теплопровідність, температуропровідність і питому теплоємність досліджуваних зразків [70].

Принцип роботи аналізатора теплопровідності C-Therm TCi заснований на тому, що струм подається на спіральний нагрівальний елемент датчика, забезпечуючи таким чином передачу невеликої кількості тепла [71].

Робота приладу XFA 300 (США, Німеччина) ґрунтується на методі ксенонового спалаху [72]. Зразок розміщується на площину, що розташована в печі. Піч розігрівається до заданої температури. Поверхня зразка опромінюється енергією імпульсу лазера (або спалахом ксенону). Ця енергія імпульсу призводить до однорідного підвищення температури на поверхні зразка. Отриману різницю значень температур в результаті підвищення температури на зворотній поверхні зразка вимірюють за допомогою високошвидкісного інфрачервоного детектора, а значення температуропровідності – обчислюється за значенням приросту температури.

Прилад LFA 467 «HyperFlash» має вертикальну оптичну систему вимірювань: джерело випромінювання знаходиться в підставці, детектор розташовується зверху, а зразок - між ними [73]. Джерелом світла служить ксенонова лампа.

Робота приладу FLASHLINE-3000/5000 базується на ефекті спалаху ксенонової газорозрядної лампи [74].

Аналізатор теплопровідності рідин THW-L1 є системою вимірювання теплопровідності і температуропровідності рідин і паст [75]. Робота приладу заснована на нестационарному методі, має невеликий час проведення вимірювання для зразків з широким діапазоном в'язкості в великому діапазоні прикладених тисків і температурі до 400°C.

Прилад TLS 100 (Канада) представляє собою портативну установку для вимірювання теплопровідності і термічного опору ґрунту та м'яких матеріалів [76].

Прилад THB-100 (США) призначений для вимірювання теплопровідності, температуропровідності і питомої теплоємності матеріалів в області енергетичного менеджменту, біогенних палив і ефективних ізоляторів для конструкційного енергозбереження, а також рідин (в тому числі сипучих матеріалів, гелів, паст) [77].

Огляд використовуваних приладів для визначення складу різних речовин за їх ТФХ показав, що вони здійснюють дослідження тільки одного зразка за сеанс

вимірювання, що суттєво збільшує час проведення досліджень, не забезпечує достовірність отриманих результатів складу речовини у випадку дослідження та порівняльного аналізу серій зразків значного обсягу та ускладнює можливості порівняльного аналізу їх ТФХ.

1.6 Сучасний стан застосування методу прямого підігріву термістора для визначення складу речовин за їх ТФХ

Для експериментального визначення ТФХ харчових рідких продуктів використовують методи та засоби (промислові прилади та лабораторні вимірювальні установки), що ґрунтуються на принципі регулярного теплового режиму [15, 16].

Суттєвий обсяг експериментальних досліджень ТФХ великої кількості різних однофазних речовин до теперішнього часу виконано за допомогою методу нагрітої нитки [23-25]. Таке широке застосування нестационарного методу нагрітої нитки пояснюється наявністю ряду переваг перед іншими методами досліджень, проте вплив граничних умов, конвективної, дифузійної і радіаційної складових в дослідженнях за цим методом на сьогодні в повній мірі не вивчені [24]. Для збільшення точності вимірювання ТФХ нанорідин використовується нестационарний метод «короткої» нагрітої нитки, теорія якого заснована на двовимірному розв'язанні рівняння Фур'є для лінійного джерела теплоти з тим же відношенням довжини нитки до діаметру [23, 24, 78]. Спроби уникнути агрегації наночасток і їх осадження описані в роботах [23, 24, 79]. У деяких роботах нагрівач і датчик температури відокремлені один від одного, проте, це не призвело до збільшення точності отриманих результатів [24].

Метод прямого підігріву термістора застосовано для вимірювання ТФХ речовин переважно у випадках, коли об'єм досліджуваного матеріалу обмежений [17-20, 46-61]. Даним методом при визначенні ТФХ речовин, на відміну від інших методів, вимірюється тільки опір термістора впродовж імпульсу його нагрівання.

Термістор для вимірювання теплопровідності використовується в роботах Чато (Chato, J.) [53], Баласубраманіама (Balasubramaniam, T.) [54-56], Бовмана (Bowman, H.) [57]. В роботах Вальвано (Valvano, J.) запропоновано форми апроксимації розподілу температури [58-60]. В його дослідженнях виконували нагрівання термістора, а одержані дані опрацьовувались методом лінійної регресії.

Вудбері (Woodbury, K.) застосував метод прямого підігріву термістора для вимірювання теплопровідності утеплення будівель з різним ступенем вологості [61].

Для визначення температури розігріву термістора більшістю дослідників використано емпіричну формулу Стейнхарта-Харта (Steinhart, J.) [80].

Кравець (Kravets, R.) був першим, хто використовував саморозігрів термістора при високих температурах [81]. Дослідник, на основі аналізу похибок вимірювання теплопровідності, прийшов до висновку, що основними причинами виникнення похибки є неточні дані властивостей еталонних середовищ, експериментальна похибка і теплові втрати (передача тепла через стрижень зонда).

Маартен Ф. ван Гельдер (Maarten F. van Gelder) в своїй роботі [51] виконав глибокий аналіз попередніх досліджень з використання методу прямого підігріву термістора і відзначив, що метод прямого підігріву термістора є найкращим для вимірювання теплопровідності і температуропровідності.

З аналізу подальших досліджень і публікацій [19, 46, 47, 82-85] можна зробити висновки, що визначення ТФХ матеріалів методом прямого підігріву термістора виконували переважно трьома способами:

- за значенням температури розігріву термістора, який має тепловий контакт з досліджуваною речовиною [51, 52];
- шляхом математичного опрацювання даних термограми розігріву термістора протягом імпульсу його розігріву [46, 47, 82];

– порівнянням температури розігріву термістора, що має тепловий контакт з досліджуваною речовиною і температури розігріву термістора, який має тепловий контакт з еталонною речовиною [83-85].

Для зменшення впливу зміни потужності термістора Кубікаром (Kubičár, Ľ.) [86] вдосконалено метод прямого підігріву термістора шляхом використання термістора тільки як датчика температури (метод нагрітої кулі).

Спосіб порівняння температур розігріву досліджуваних та контрольних речовин наведено в [17-20, 83-85]. В роботах [19, 20] для вимірювання ТФХ речовин використовували два вимірювальні зонди, один з яких розміщено в досліджуваній суміші, а інший – в контрольній. В інших дослідженнях [17, 18] використано один зонд, що послідовно занурювався спочатку в контрольну суміш, а потім – в досліджувану. В роботі [22] відзначено, що процес нагрівання термістором досліджуваної суміші супроводжується явищем конвекції.

Математичні моделі розрахунку ТФХ досліджуваних речовин методом прямого підігріву термістора потребують удосконалення, оскільки існуючі моделі частково або в повній мірі не враховують ряд факторів, які впливають на точність визначення ТФХ, а саме: залежність температури розігріву термістора від температури досліджуваної рідини; вплив наявності оболонки у термістора на похибку вимірювання; відхилення електричних характеристик термістора від номінальних значень тощо.

Існуючі математичні моделі не розраховані на одночасну обробку масивів даних вимірювання, а орієнтовані на індивідуальний розрахунок ТФХ досліджуваного матеріалу за даними вимірювання одного зонду. Даний факт не дозволяє виконувати достовірний аналіз складу досліджуваних серій зразків значних обсягів за їх ТФХ.

Висновки до розділу та постановка задач дисертаційних досліджень

На основі вищевикладеного можна зробити висновок, що ефективний метод дослідження речовин ґрунтується на визначенні їх ТФХ, зокрема теплопровідності. Не існує однозначний опис теплофізичних механізмів, що відбуваються протягом короткочасного нагрівання різноманітних речовин

(харчових продуктів, біологічних матеріалів, охолоджуючих речовин, нанорідин тощо) джерелом тепла малих розмірів. Тому важливим фактором для достовірного визначення складу речовин є їх теплофізичні характеристики як основні параметри властивостей вказаних речовин при їх застосуванні.

Існуючі методи, що застосовуються для визначення складу речовин за їх ТФХ є складними в реалізації, вимагають довготривалих досліджень, пред'являють підвищені вимоги до умов експерименту, потребують тривалого процесу градування, характеризуються складністю конструкції вимірювальної комірки, мають обмежену чутливість датчиків та вимагають великого об'єму досліджуваної речовини, що призводить до значної похибки вимірювань. Це суттєво обмежує можливості методу контролю складу речовини за величиною теплопровідності для його практичного використання у біомедичних дослідженнях та дослідженнях харчових продуктів і нанорідин.

Враховуючи проаналізовані вище особливості різних методів для визначення складу досліджуваних речовин на основі їх теплофізичних властивостей, а саме величини теплопровідності, доцільно застосувати метод прямого підігріву термістора, який є нестационарним (тобто за якого температура об'єкта може змінюватись в процесі контролю), контактним та одnobічним методом теплового неруйнівного контролю досліджуваної речовини. Використання такого методу дозволяє одночасно здійснювати вимірювання та контроль складу різноманітних речовин за їх ТФХ [9, 87-92].

Оскільки теплові вимірювання не мають масового характеру, на сьогодні для вимірювання складу речовин та їх ТФХ використовують прилади, що виготовляються невеликими партіями або в одиничних екземплярах. При цьому застосовуються засоби для визначення ТФХ речовин, вимірювальні комірки яких є конструктивно складними, потребують використання значного об'єму досліджуваної речовини та не дозволяють виконувати одночасне вимірювання багатьох досліджуваних зразків, а похибка вимірювання при цьому є значною. В багатьох випадках величина цієї похибки не задовольняє вимогам до проведення теплофізичних досліджень.

Тому метою дисертаційної роботи є вдосконалення методу контролю складу речовин шляхом визначення їх теплопровідності та створення засобу з підвищеними показниками точності, продуктивності та розширеними функціональними можливостями, що їх реалізує.

Для досягнення мети поставлені такі **завдання**.

1. Виконати порівняльний аналіз сучасного стану теоретичних та практичних засад контролю складу речовин.
2. Обґрунтувати можливість контролю складу речовин шляхом визначення їх теплопровідності.
3. Розробити математичну модель визначення теплопровідності, що характеризує склад досліджуваної речовини.
4. Розробити багатоканальний прилад для одночасного контролю та вимірювання теплопровідності великої кількості зразків за однакових умов проведення досліджень з підвищеною точністю та продуктивністю.
5. Створити алгоритмічне та програмне забезпечення системи обробки результатів вимірювань.
6. Провести експериментальні дослідження ефективності використання запропонованого методу для визначення та контролю складу речовин на основі вимірювання їх теплопровідності з застосуванням розробленого приладу.
7. Виконати аналіз похибок вимірювання і обґрунтувати шляхи їх зниження та зменшення часу проведення досліджень.
8. Виконати апробацію та впровадження вдосконаленого методу контролю складу речовин за величиною їх теплопровідності.

Представлені в даній дисертаційній роботі положення і результати, які виносяться на захист, відповідають формулі паспорту спеціальності 05.11.13 – «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин», а саме: підвищення точності, вірогідності, чутливості, швидкодії, надійності приладів контролю та визначення складу речовин.

РОЗДІЛ 2.

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ СКЛАДУ РЕЧОВИН ЗА ЇХ ТЕПЛОПРОВІДНІСТЮ

В даному розділі обґрунтовано вибір методу та чутливих елементів для визначення теплопровідності речовин для контролю їх складу. Представлено вдосконалену математичну модель розрахунку теплопровідності речовин та обґрунтовано необхідність введення поправок в існуючу розрахункову формулу визначення теплопровідності. Визначено значення корегуючих коефіцієнтів, що враховують нелінійність вольт-амперної характеристики термістора, відхилення геометричних параметрів головки термісторів, чутливість термістора та залежність коефіцієнта теплопровідності від температури досліджуваного зразка і обчислюються за даними вимірювань на еталонних речовинах.

2.1 Вибір та обґрунтування методу визначення теплопровідності речовин

На основі розглянутих в розділі 1 методів вимірювання ТФХ параметрів речовин можна стверджувати, що існуючі методи вимірювання теплофізичних властивостей мають цілий ряд недоліків. Практичне втілення більшості методів потребує громіздкого обладнання, що унеможливорює одночасне вимірювання великої кількості досліджуваних зразків. Часто в приладах застосовуються датчики інтегральної конструкції, що мають значну нелінійність вихідної характеристики від температури і достатньо малу вартість, але саме інтегральна конструкція є «ахіллесовою п'ятою» таких елементів, зважаючи на обмеженість робочого температурного діапазону [92].

Для вирішення поставленого завдання пропонується в основу методики визначення ТФХ покласти метод прямого підігріву термістора, як найзручніший на думку багатьох дослідників [51], для вимірювання теплопровідності. Термістор, на відміну від наведених термоперетворювачів, має достатньо

широкий діапазон робочих температур, можливість віддаленого моніторингу та відносно малі розміри датчика (зонду) [93, 94].

Визначення ТФХ речовин методом прямого підігріву термістора, що розташовується в досліджуваній рідині, базується на вимірюванні температури саморозігріву термістора під дією імпульсу струму. Цей метод завдяки невеликим розмірам зонду (термістора) та простій конструкції приладу може широко використовуватися в різних галузях промисловості для визначення ТФХ різних речовин при невеликій вартості обладнання.

На запропонований метод визначення теплопровідності речовин отримано патент України на винахід, №113044 від 25.11.2016 [95].

2.2 Вибір та обґрунтування чутливого елемента

Чутливим елементом для вимірювання теплопровідності речовин у вибраному методі є термістор. Термістори [93, 94, 96-100] – це термометри опору, в основу конструкції яких покладено змішані оксиди перехідних металів. Існує два основні типи термісторів – NTC (з від'ємним температурним коефіцієнтом опору) і PTC (з додатнім коефіцієнтом). Найбільш поширений типом термістора є NTC. Термістори типу PTC використовуються в основному в системах сигналізації і контролю.

Основними конструктивними видами термісторів типу NTC є бусинкові (діаметр головки 0,1–1 мм), дискові (діаметр голівки 2,5–18 мм), циліндричні (діаметр голівки 3–40 мм) та з плівковим покриттям (товщина 0,2–1 мм). Бусинкові термістори діаметром до 0,07 мм з виводами товщиною 0,01 мм. дозволяють вимірювати температуру всередині кровоносних судин та рослинних клітин, що важливо в дослідженнях ТФХ біологічних матеріалів.

Більшість термісторів – керамічні напівпровідники, що виготовлені з гранульованих оксидів і нітридів металів шляхом формування складної багатофазової структури з наступним спіканням на повітрі при 1100–1300° С. Найбільш стабільними термісторами, що застосовуються при температурах нижче

250°C, є термістори на основі змішаних оксидів магнію і нікелю, нікелю і кобальту, які мають негативний температурний коефіцієнт опору.

При виготовленні термісторів у вигляді краплі (бусинкові), кристал термістора сплавляють з двома паралельними платиновими дротами при температурі 1100°C. На кристал термістора наноситься скляне покриття, що спікається за температури 300°C, або кристал герметизуються всередині мініатюрних скляних трубок.

Залежність опору термістора R від температури T можна представити наступною формулою [96]:

$$R(T) = A \exp\left(\frac{b}{T}\right), \quad (2.1)$$

де A , b – константи, що залежать від властивостей матеріалу і геометричних розмірів термістора.

Однак, властивості термістора не дозволяють безпосередньо використовувати його теоретичну вольт-амперну характеристику і вимагають емпіричного підходу у випадку високоточних вимірювань. Для NTC-термісторів найчастіше використовується апроксимаційна залежність Стейнхарта і Харта [80]:

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c[\ln(R)]^3, \quad (2.2)$$

де T – температура термістора, К;

R – опір термістора при температурі T , Ом;

a , b , c – константи термістора, що отримані при його градуюванні в трьох температурних точках (при трьох різних температурах), які віддалені одна від одної не менше, ніж на 10°C.

Термістори даного типу потребують індивідуального градуювання. Градуювання термісторів може здійснюватися в рідинних термостатах у діапазоні від 0 до 100°C з інтервалом 20°C.

Причинами нестабільності термісторів є: напруги, що виникають у матеріалі при його термоциклюванні та появі мікротріщин; структурні зміни в напівпровіднику; зовнішнє забруднення (різними речовинами) та в результаті

хімічних реакції в порах і на поверхні напівпровідника; порушення адгезії металевої плівки; наявність домішок з металевих контактів в матеріалі термістора.

На рис. 2.1 наведено вольт-амперну характеристику термістора з постійною температурою [94].

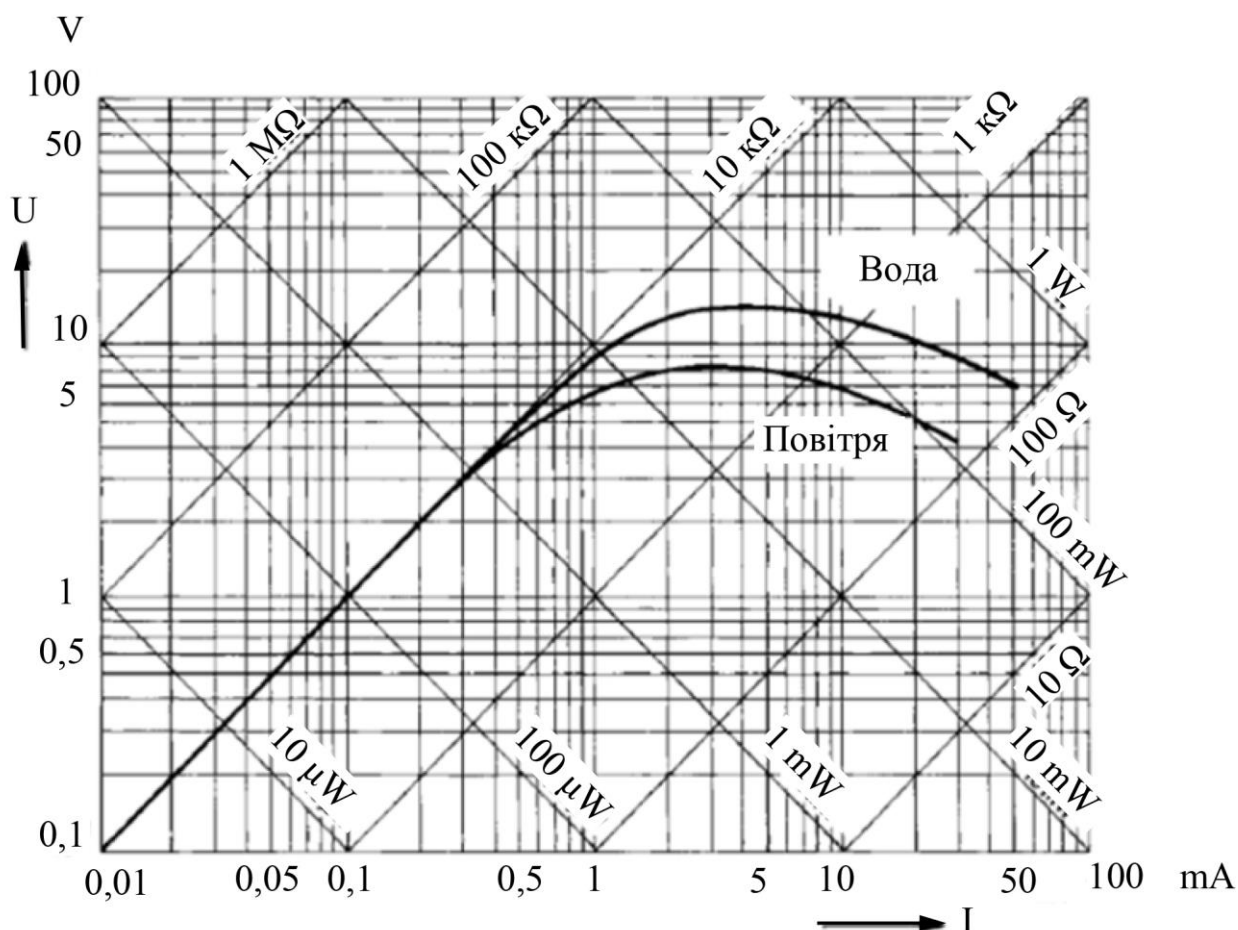


Рис. 2.1. Вольт-амперна характеристика термістора при постійній температурі [94].

Наведена вольт-амперна характеристика термістора з від'ємним температурним коефіцієнтом (NTC) (рис. 2.1) має три ділянки:

– ділянка прямого підвищення, де електрична потужність термістора не приводить до значного його саморозігріву. Напруга і струм на цій ділянці відповідають закону Ома. Опір термістора визначається температурою навколишнього середовища. На цій ділянці термістори використовуються як датчики температури ($R = dU/dI = \text{const}$);

– ділянка нелінійного підвищення до максимальної напруги, де опір розпочинає знижуватися. При максимальній напрузі відносне зменшення опору $\Delta R/R$ внаслідок його саморозігріву дорівнює відносному збільшенню струму $\Delta I/I$ ($R > dU/dI \geq 0$);

– ділянка падіння напруги, де зменшення опору більше ніж відносне збільшення струму. Ця ділянка використовується для вимірювання ТФХ рідин при проведенні досліджень в методі прямого підігріву термістора. Тут проявляється ефект його саморозігріву. На цій ділянці $dU/dI \leq 0$.

На роботу термістора впливає середовище, в якому він знаходиться. Як видно з вольт-амперної характеристики термістора (рис. 2.1), на неї впливає не тільки опір $R(T)$, а і коефіцієнт розсіювання δ_{th} . [94]. Опір термістора залежить від розмірів, форми і виводів термістора та оточуючого середовища, в якому він розташований. На рис. 2.1 показані вольт-амперні характеристики термістора, що розташований в різних середовищах – в воді (верхня крива) і в повітрі (нижня крива). Якщо коефіцієнт розсіювання середовища δ_{th} [94] більший, то крива U/I на певній ділянці буде зміщуватись уверх, а якщо термістор знаходиться в вакуумі – крива опуститься. Таким чином за вольт-амперною характеристикою можна визначити середовище, в якому розміщений термістор. Дана властивість вольт-амперної характеристики і використовується в дослідженнях теплопровідності речовин.

Для визначення теплопровідності рідин в якості чутливого елемента (ЧЕ) вибрано термістор, який має такі характеристики [93,94, 96-100]:

– мінімально можливі розміри, оскільки термістор невеликих розмірів буде швидше розігріватися, а це скоротить термін проведення процедури вимірювання і зменшить об'єм досліджуваної рідини;

– мінімальний опір при нормованій температурі $T = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$, що забезпечить максимальну потужність розсіювання термістора при мінімальній напрузі на ньому і зменшить напругу його живлення;

– мінімальну похибку номінального опору (при $T = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$) та мінімальну похибку значення коефіцієнта технологічності термістора B ;

– мінімальну постійну часу термістора, що забезпечить найменший термін проведення процедури вимірювання;

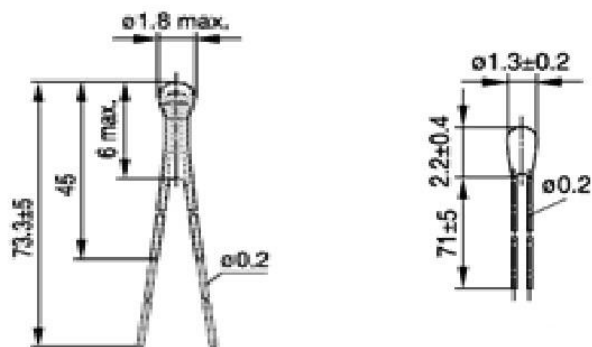
– максимально допустиму потужність розсіювання для забезпечення необхідної температури саморозігріву термістора, що в свою чергу збільшує чутливість зонду до ТФХ навколишнього середовища.

Крім того, поверхня термістора має бути захищеною від дії агресивних середовищ, оскільки більшість рідин є хімічно активними речовинами.

В результаті аналізу термісторів, що виготовляються серійно, обрано термістори, які найбільше відповідають наведеним вище вимогам [96-100]. Їх характеристики представлені в таблиці 2.1, а їх розміри – на рис. 2.2.

Таблиця 2.1. Характеристики термісторів, що рекомендуються використовувати при дослідженні теплопровідності речовин.

| Характеристика | Типи термісторів | | |
|--|--|----------------------|----------------------|
| | RH16 - 3G202FB «MITSUBISHI MAT. CORP.» | B57551G1 «EPCOS» | B57550G1 «EPCOS» |
| Опір термістора при $T=25\text{ }^{\circ}\text{C} - R_{25}$ | 2кОм | 2кОм | 2кОм |
| Мінімальна відносна похибка значення опору, $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ | $\pm 1\%$ | $\pm 1\%$ | $\pm 1\%$ |
| Коефіцієнт $B_{25/50, K}$ | 3930 | | |
| Коефіцієнт $B_{25/85, K}$ | 3488 | 3406 | 3406 |
| Коефіцієнт $B_{0/100, K}$ | | 3379 | 3379 |
| Мінімальна відносна похибка значення коефіцієнта B | $\pm 1\%$ | $\pm 1\%$ | $\pm 1\%$ |
| Діапазон робочих температур, $^{\circ}\text{C}$ | від - 40 до + 110 | від - 55 до + 260 | від - 55 до + 300 |
| Постійна часу (час розігріву) τ , сек. | 6 | 9 | 7 |
| Максимальна потужність P , мВт | 51 | 32 | 32 |
| Коефіцієнт розсіювання δ , $\text{мВт}/^{\circ}\text{C}$ | 0,6 | 0.8 | 0.75 |



а)

б)

Рис. 2.2. Габаритні розміри термісторів [96-100]: а) – модель B57551G1; б) – модель B57550G1.

В якості ЧЕ при дослідженні теплопровідності речовин відповідно до сформульованого завдання вибрано термістор з від'ємним температурним коефіцієнтом опору (із зростанням температури опір термістора падає) серії NTC RH16 – 3G202FB компанії «MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION». В нього, в порівнянні з термісторами інших типів, є найменша постійна часу, що складає 6 сек. і найбільша допустима потужність – 52 мВт. При вимірюваннях ТФХ рідин в умовах підвищених температур доцільно застосовувати термістори B57551G1 та B57550G1 компанії «EPCOS».

Конструкція зонду, як ЧЕ при дослідженні теплопровідності речовин на основі використання термістора, має бути максимально простою, тому для вимірювання теплопровідності речовин та газів вибрана конструкція ЧЕ (рис. 2.3). Для вимірювання теплопровідності твердих речовин пропонується конструкція, що наведена на рис. 2.4. Термістор закріплюється на кінці конусоподібного утримувача, що є звуженим до низу. Така конструкція забезпечує максимальний тепловий опір утримувача і, таким чином, мінімізує відтік тепла від термістора через утримувач.

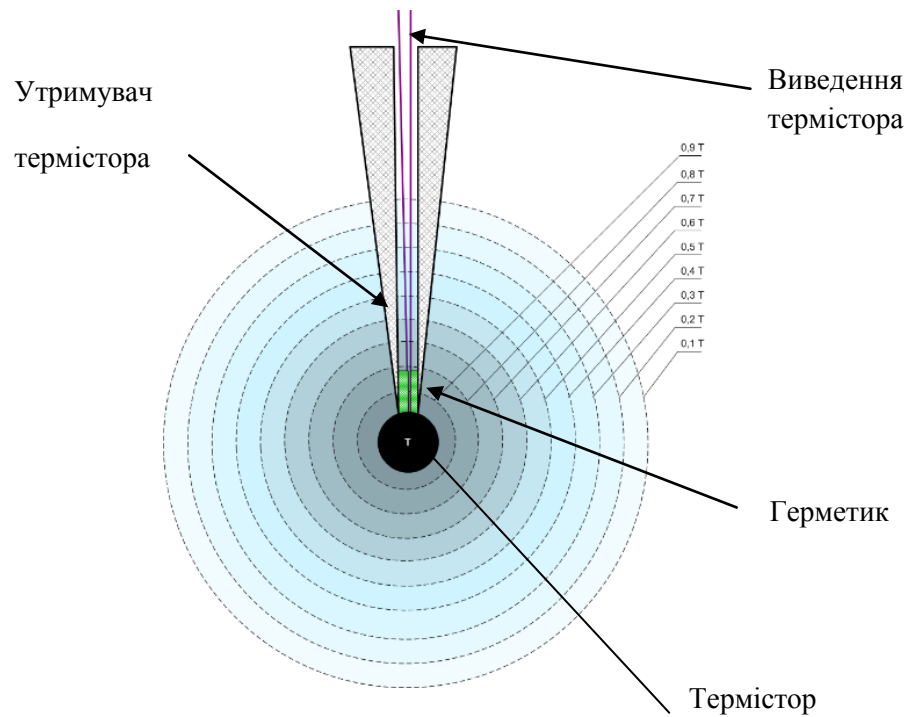


Рис. 2.3. Конструкція чутливого елементу (термісторного зонду) для вимірювання теплопровідності речовин та газів [101].

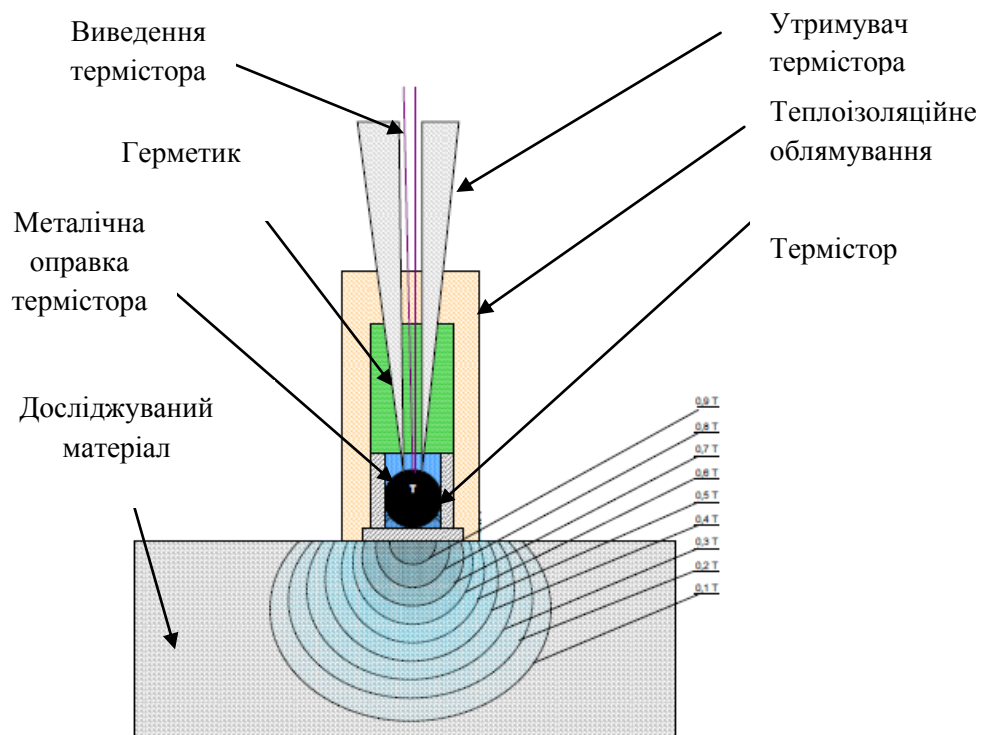


Рис. 2.4. Конструкція чутливого елементу (термісторного зонду) для вимірювання теплопровідності твердих матеріалів.

2.3 Дослідження розповсюдження теплової енергії від чутливого елементу

Струм, який протікає крізь ЧЕ – термістор, призводить до його додаткового нагрівання (саморозігріву). Температура саморозігріву термістора залежить від того, в якому середовищі знаходиться термістор.

При саморозігріві термістора від дії на нього електричного імпульсу потік тепла q (рис. 2.5) розповсюджується в напрямку контейнера термостата через стінки спеціалізованої посудини [102]. На шляху розповсюдження тепла тепловий потік зустрічає послідовно термічний опір оболонки термістора $R_{об.}$, досліджуваної речовини $R_{досл. \text{ рід.}}$, пробірки $R_{проб.}$, повітряного зазору між пробіркою та стінкою лунки картриджу термостата $R_{пов. \text{ заз.}}$ та термічний опір картриджу термостата $R_{картр.}$. Окрім цього, від оболонки термістора відтік тепла буде здійснюватись також через тримач термістора в напрямку кріплення термісторного зонду, яке знаходиться при кімнатній температурі. Термічний опір тримача $R_{трим.}$ визначається ТФХ матеріалу, з якого він виготовлений, та його розмірами.

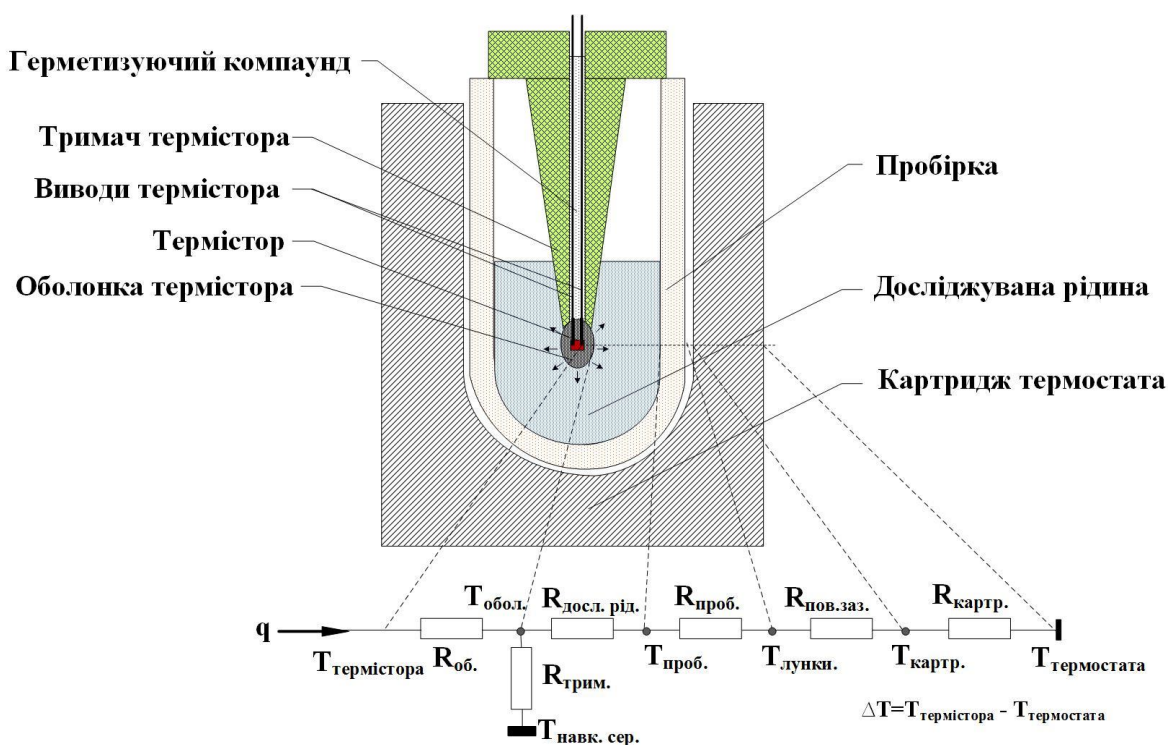


Рис. 2.5. Схема розповсюдження теплової енергії від чутливого елементу (термісторного зонду), при $\Delta T(t) = T_{термістора} - T_{термостата}$.

Термічні опори в схемі розповсюдження тепла розраховуються за такими формулами [46, 102]:

$$R_{об.} = \frac{1}{k_{об.}} = \frac{1}{\alpha_1 * d_1} + \frac{1}{2\lambda_{об.}} \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right) + \frac{1}{\alpha_2 + d_2}, \quad (2.3)$$

$$R_{досл.рід.} = \frac{1}{k_{досл.рід.}} = \frac{1}{\alpha_2 * d_2} + \frac{1}{2\lambda_{досл.рід.}} \ln\left(\frac{d_2}{d_3}\right) + \frac{1}{\alpha_3 + d_3}, \quad (2.4)$$

$$R_{проб.} = \frac{1}{k_{проб.}} = \frac{1}{\alpha_3 * d_3} + \frac{1}{2\lambda_{проб.}} \ln\left(\frac{d_3}{d_4}\right) + \frac{1}{\alpha_4 + d_4}, \quad (2.5)$$

$$R_{нов.заз.} = \frac{1}{k_{нов.заз.}} = \frac{1}{\alpha_4 * d_4} + \frac{1}{2\lambda_{нов.заз.}} \ln\left(\frac{d_4}{d_5}\right) + \frac{1}{\alpha_5 + d_5}, \quad (2.6)$$

$$R_{картр.} = \frac{1}{k_{картр.}} = \frac{1}{\alpha_5 * d_5} + \frac{1}{2\lambda_{картр.}} \ln\left(\frac{d_5}{d_6}\right) + \frac{1}{\alpha_6 + d_6}, \quad (2.7)$$

$$R_{трим.} = \frac{1}{k_{трим.}} = \frac{1}{\alpha_7} + \frac{l_{трим.}}{2\lambda_{трим.}} + \frac{1}{\alpha_8}, \quad (2.8)$$

де $R_{об.}$, $R_{досл.рід.}$, $R_{проб.}$, $R_{нов.заз.}$, $R_{картр.}$, $R_{трим.}$ – термічний опір відповідно оболонки термістора, досліджуваної речовини, пробірки, повітряного зазору між пробіркою та картриджем термостата, картриджа термостата та тримача термістора;

$k_{об.}$, $k_{досл.рід.}$, $k_{проб.}$, $k_{нов.заз.}$, $k_{картр.}$, $k_{трим.}$ – теплопровідності, відповідно оболонки термістора, досліджуваної речовини, пробірки, повітряного зазору між пробіркою та картриджем термостата, картриджа термостата та тримача термістора;

$\lambda_{об.}$, $\lambda_{досл.рід.}$, $\lambda_{проб.}$, $\lambda_{нов.заз.}$, $\lambda_{картр.}$, $\lambda_{трим.}$ – коефіцієнти теплопровідності, відповідно оболонки термістора, дослідної речовини, пробірки, повітряного зазору між пробіркою та картриджем термостата, картриджа термостата та тримача термістора;

d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , d_5 , d_6 , – відповідно діаметри термістора, оболонки термістора, внутрішній діаметр пробірки, зовнішній діаметр пробірки, діаметр лунки в картриджі термостата та діаметр картриджа термостата;

$l_{трим.}$ – довжина тримача;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8$ – відповідно коефіцієнти тепловіддачі оболонки термістора, дослідної речовини, пробірки, повітряного зазору між пробіркою та картриджем термостата, стінки лунки картриджа термостата, самого термостата, тримача термістора та вузла кріплення тримача.

Враховуючи те, що нагрівання термістора триває досить швидко і за цей час тепло від термістора майже не розповсюджується за межі пробірки, то опори пробірки, повітряного зазору між пробіркою та контейнером термостата не є суттєвими і в розрахунках не враховуються.

Тоді еквівалентна схема розповсюдження теплової енергії буде мати вигляд, що представлений на рис. 2.6.

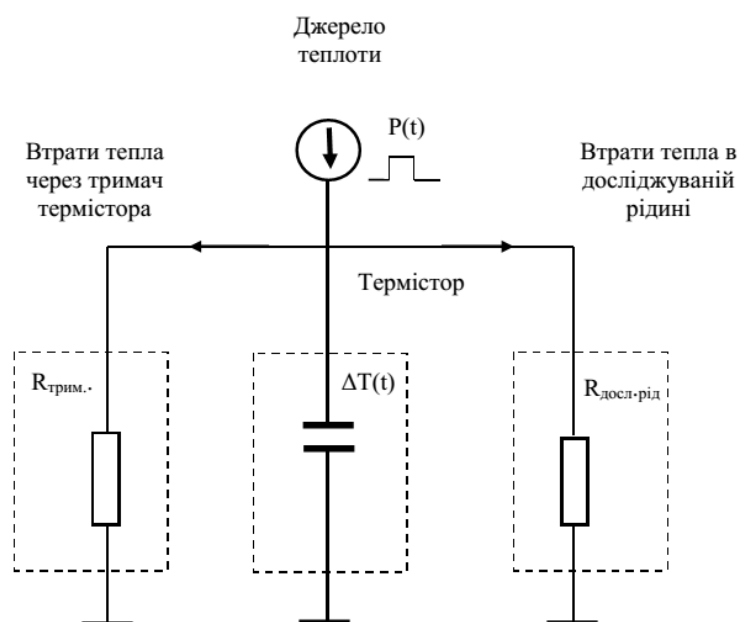


Рис. 2.6. Еквівалентна схема розповсюдження теплової енергії в термісторному зонді [46].

Під дією імпульсу електричного струму тепла енергія, яка виробляється термістором, розсіюється в досліджуваній речовині та конструкцією тримача термістора. При цьому термістор поступово прогрівається протягом часу тривалості імпульсу. Графік саморозігріву термістора, що представляється в вигляді термограми, використовується для визначення ТФХ досліджуваних речовин.

Рівняння балансу теплової енергії має вигляд:

$$E_{\partial.m.} + E_{\partial.p.} + E_{m.m.} = 0, \quad (2.9)$$

де $E_{\partial.p.}$ – теплова енергія досліджуваної речовини; $E_{m.m.}$ – теплова енергія тримача термістора; $E_{\partial.m.}$ – теплова енергія, яка виробляється термістором залежить від напруги, що подається на нього, та величини його електричного опору.

Залежність електричного опору термістора від температури вимірювання T має наступний вигляд [94]:

$$R_T = R_N \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N} \right), \quad (2.10)$$

де R_T – опір термістора при температурі вимірювання T в K , Ω ;

R_N – опір термістора в при номінальній температурі T_N в K , Ω ;

B – технологічний коефіцієнт, що залежить від матеріалу термістора, в K .

Дану формулу можна застосовувати для вимірювання температури в вузькому діапазоні, тому що вона не враховує залежність коефіцієнта B від температури розігріву термістора. Зазвичай для кожного типу термістора ця залежність приводиться в спеціальних таблицях. У разі точних розрахунків теплопровідності її необхідно враховувати. Значення коефіцієнта B визначається за формулою [94]:

$$B(T) = \frac{T \cdot T_N}{T - T_N} \ln \frac{R_N}{R_T} \quad (2.11)$$

та характеризує величину нахилу характеристичної кривої $R = f(T)$. Для обчислення $B_{25/100}$ між точками при температурі $+25^\circ C$ (T_1) та температурі $+100^\circ C$ (T_2) вона матиме такий вигляд [94]:

$$B_{25/100} = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2} = \frac{(25 + 273,15)(100 + 273,15)}{75} \ln \frac{R_{25}}{R_{100}} = 1483,4 \ln \frac{R_{25}}{R_{100}}. \quad (2.12)$$

Схема вимірювального мосту, де в якості плеча використано термісторний зонд, приведена на рис. 2.7. При подачі на вимірювальний міст імпульсного струму амплітудою U_i , на термісторі з опором $R_{терм.}$ виникає напруга $U_{вих}$, що зменшується протягом дії імпульсу розігріву. Напруга розбалансування

вимірювального мосту U_m реєструється впродовж імпульсу і в результаті цього вимірювання одержуємо термограму розігріву термістора.

Для розрахунку характеристик вимірювального мосту використано схему включення термістора RH16, що надана виробником термісторів Mitsubishi – «Thermistor–simulation» [100].

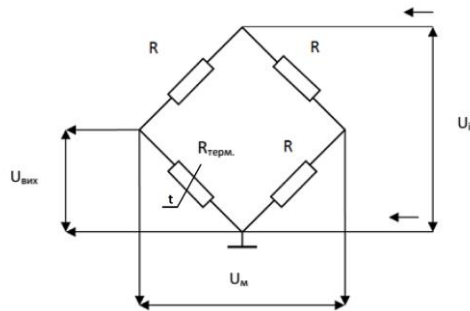


Рис. 2.7. Схема вимірювального мосту з використанням термісторного зонду.

Для цього в вікно програми «Thermistor–simulation» на її сторінці «Input&Output» (рис. 2.8) вводяться характеристики термістора та вказується схема його включення.

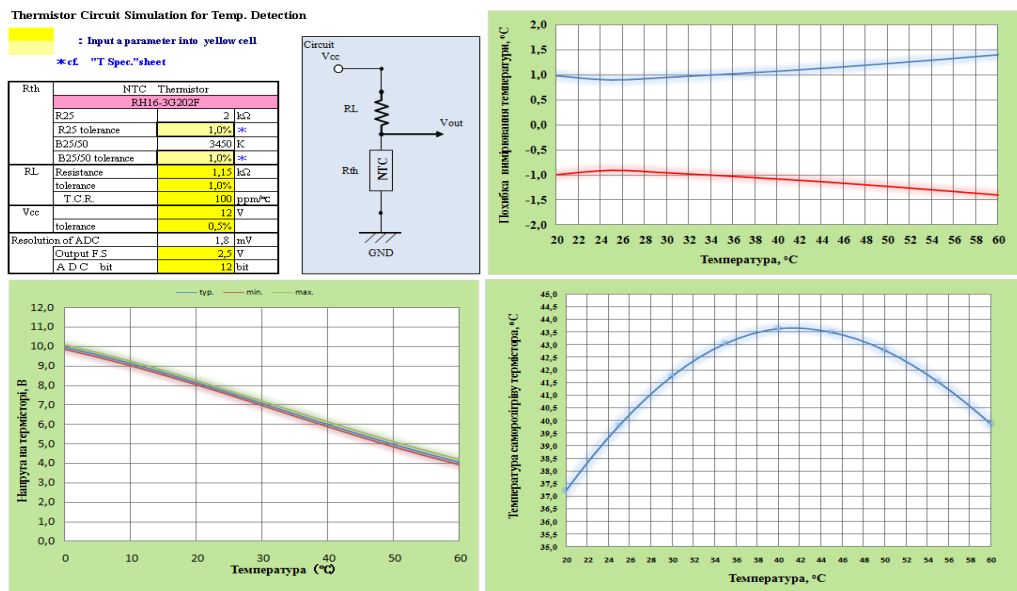


Рис.2.8. Загальний вигляд сторінки «Input&Output» програми «Thermistor–simulation».

Тоді у відповідних вікнах сторінки програми «Thermistor–simulation» відображаються графіки залежності напруги на термісторі, температури його розігріву та похибки вимірювання температури в діапазоні температур від +30 °C до +65 °C (рис. 2.8).

За допомогою програми «Thermistor–simulation» на її сторінці «Caltable» надається графік залежності коефіцієнта B від температури дослідження для термістора RH16 (рис. 2.9):

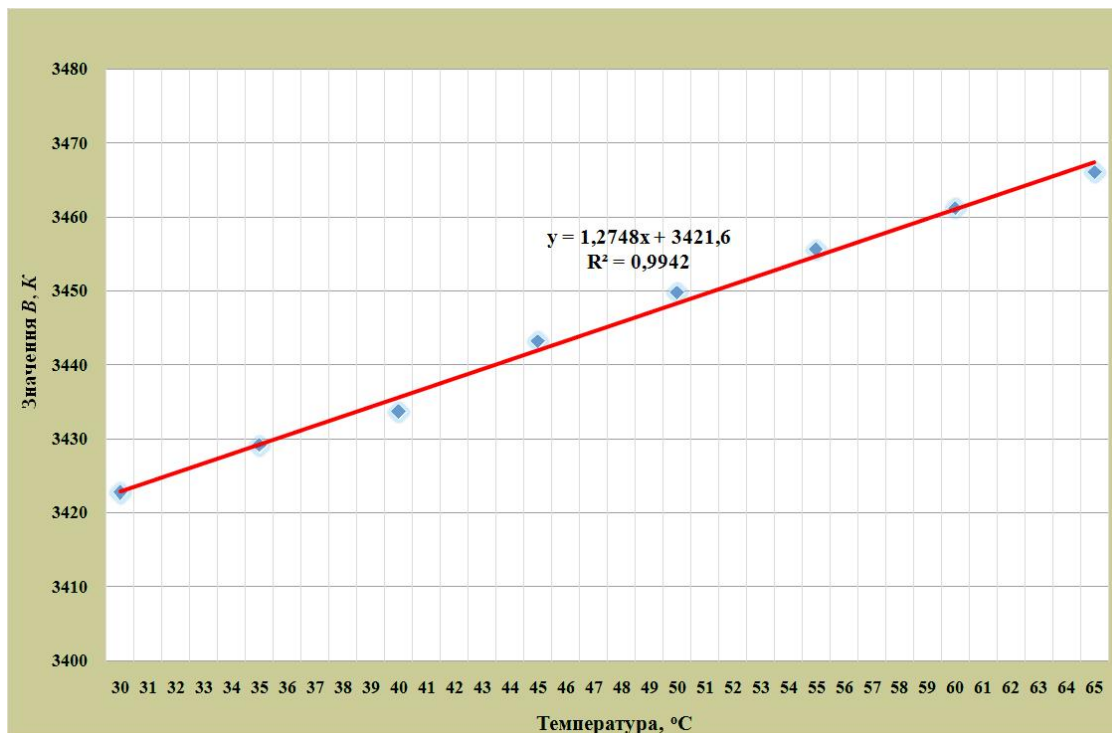


Рис. 2.9. Графік залежності коефіцієнта B від температури в діапазоні від +30 °C до +65 °C.

Лінійну апроксимацію залежності коефіцієнта B від температури в діапазоні від +30 °C до +65 °C представлено в вигляді рівняння:

$$B_t = 1,2748T + 3421,6. \quad (2.13)$$

Це рівняння використовується при розрахунку залежності числових значень на виході АЦП від температури розігріву термістора.

За графіком залежності похибок характеристик термістора що одержана за допомогою програми «Thermistor–simulation» (рис. 2.10), визначено похибку вимірювання термісторним зондом.

З наведеного графіку видно, що похибка при вимірюванні температури середовища термістором в діапазоні температур від $+20^{\circ}\text{C}$ до $+60^{\circ}\text{C}$ не перевищує $\pm 1,2^{\circ}\text{C}$. Це означає, що для збільшення точності визначення температури розігріву необхідно для кожного із термісторів ввести відповідні корегуючі коефіцієнти шляхом їх калібрування.



Рис. 2.10. Графік залежності похибок характеристик термістора від температури досліджуваного середовища.

Похибка при вимірюванні температури середовища термістором виникає за рахунок відхилення номінального значення опору термістора при $+25^{\circ}\text{C}$, яка складає $\pm 1\%$, та похибки визначення технологічного коефіцієнта B , яка дорівнює $\pm 1\%$.

Для визначення граничної температури, до якої може нагрітися термістор в повітрі при температурі навколишнього середовища в діапазоні температур від $+20^{\circ}\text{C}$ до $+60^{\circ}\text{C}$, використано графік його саморозігріву (рис. А.1 Додатку А). В повітрі термістор буде розігріватися найбільше, тому що повітря має низький коефіцієнт теплопровідності.

Діапазон температур, в якому проводиться вимірювання теплопровідності, визначається технічними характеристиками термістора (опором термістора при $+25^{\circ}\text{C}$ – R_{25} та значенням технологічного коефіцієнта B залежності опору термістора від температури) і параметрами вимірювальних каналів (значенням опорів вимірювального мосту та коефіцієнтом підсилення сигналу).

Таким чином, змодульовано залежність електричного опору термістора від температури, що представлена виразом (2.10), яка враховує значення технологічного коефіцієнта B та температури досліджуваного середовища.

2.4. Математична залежність напруги на виході АЦП від температури розігріву термістора

2.4.1 Структурна схема вимірювального каналу

Для визначення числових значень на виході АЦП від температури розігріву термістора враховано схемотехнічні особливості розробленого вимірювального каналу, структурна схема якого наведена на рис. 2.11 [102].

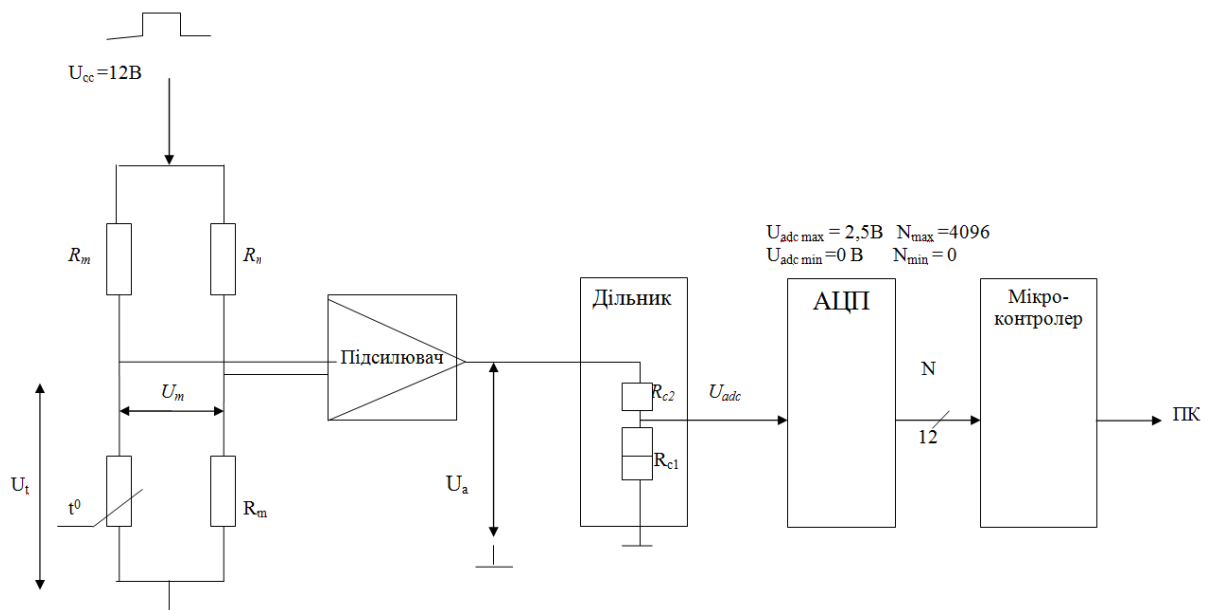


Рис. 2.11. Структурна схема вимірювального каналу.

В одне із плечей вимірювального мосту включено термістор R_t . Міст збалансовано при $+40^{\circ}\text{C}$. Напруга в діагоналі моста посилюється підсилювачем і подається через дільник на АЦП. Дільник напруги необхідний для узгодження

діапазону напруги на виході підсилювача, який складає від 0 до +12 В з допустимою максимальною напругою на вході АЦП, що змінюється від 0 до +2,5 В. На виході АЦП отримуємо числове значення, що є пропорційним напрузі розбалансування моста. Це розбалансування вимірюється мікроконтролером протягом тривалості імпульсу і передається через інтерфейс в ПК. За одержаною термограмою розігріву термістора, числові значення якої зберігаються в файлі даних, визначається температура розігріву термістора під дією імпульсу струму.

2.4.2 Залежність потужності, що подається на термістор, від температури його розігріву

Потужність, яка подається на термістор для його розігріву, визначається як:

$$P_T = U_T I_T, \quad (2.14)$$

де U_T – напруга на термісторі, В;

I_T – струм, що проходить крізь термістор, А.

Напруга на термісторі визначається за формулою:

$$U_T = \frac{U_i}{2} - \frac{1}{-K_a} \left(\frac{(R_{C1} + R_{C2}) U_{AЦП \max}}{R_{C1} N_{AЦП \max}} N_{AЦП} \right), \quad (2.15);$$

а струм, що проходить крізь термістор:

$$I_T = \frac{U_i}{2R_M} + \frac{1}{-K_a R_M} \left(\frac{(R_{C1} + R_{C2}) U_{AЦП \max}}{R_{C1} N_{AЦП \max}} N_{AЦП} \right), \quad (2.16)$$

де U_i – амплітуда імпульсу, В;

K_a – коефіцієнт підсилення підсилювача;

R_{C1} і R_{C2} – опори діляника напруги на виході підсилювача, Ом;

R_M – постійні опори вимірювального мосту, Ом;

$U_{AЦП \max}$ – максимальна напруга на вході АЦП, В;

$N_{AЦП \max}$ – максимальне числове значення на виході АЦП, у.о.;

$N_{AЦП}$ – числове значення розбалансування вимірювального мосту, у.о..

Таким чином, потужність P_T , що виділяється на термісторі, дорівнює:

$$P_T = \frac{U_i^2}{4R_m} - \left(\frac{N_{АЦП} U_{АЦП \max} (R_{C1} + R_{C2})}{N_{АЦП \max} R_{C1} K_a} - \frac{U_i}{2K_a} \right)^2 \frac{1}{R_m}. \quad (2.17)$$

Із формули (2.17) видно, що потужність є пропорційною квадрату вимірюваного числового значення розбалансування вимірювального мосту $N_{АЦП}$. Використовуючи залежність $N_{АЦП} = f(T)$ та підставивши її в формулу (2.17), побудовано графік залежності потужності термістора P_T від його температури розігріву $^{\circ}\text{C}$, що наведено на рис. 2.12, при

$R_m = 1,12 \text{ кОм}$; $R_{25} = 2 \text{ кОм}$; $T_{25} = 298,15 \text{ К}$; $R_{C1} = 4,02 \text{ кОм}$; $R_{C2} = 18,7 \text{ кОм}$;
 $U_{АЦП \max} = 2,5 \text{ В}$; $K_a = 8,48$; $N_{АЦП \max} = 2^{12} = 4096$; $U_i = 12 \text{ В}$, $N_{АЦП} = 0 \dots 4096$.

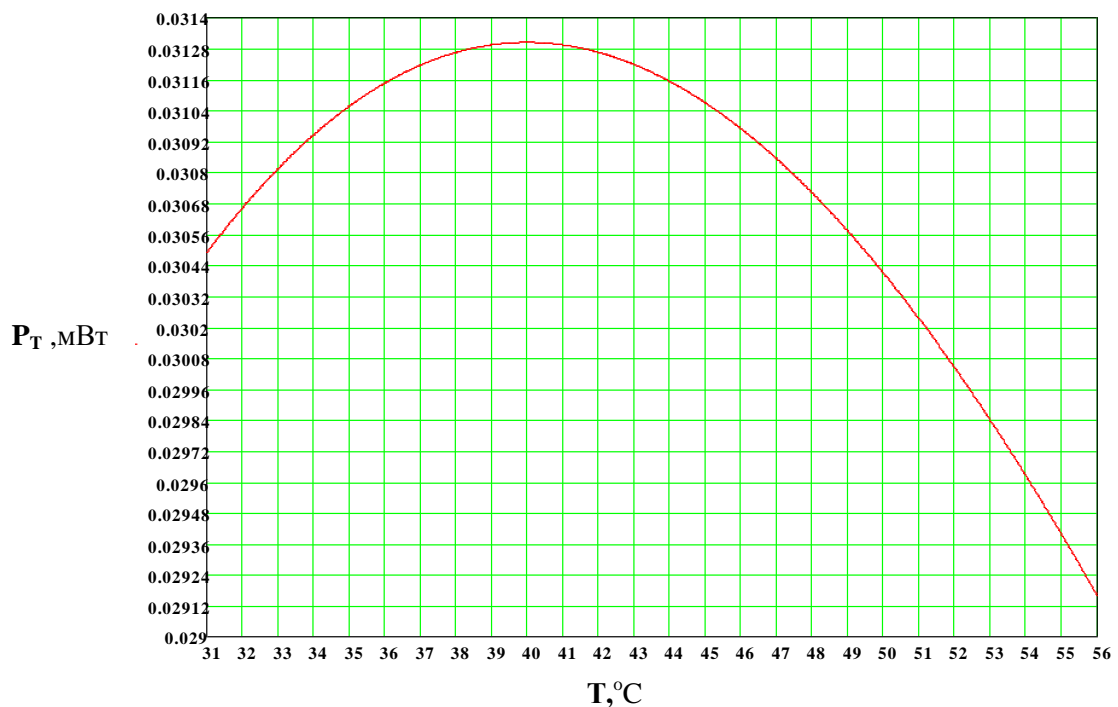


Рис. 2.12. Залежність потужності, яка подається на термістор, від температури його розігріву.

Максимальне значення потужності відповідає опору термістора, що пропорційне опору постійних резисторів вимірювального мосту. Оскільки термістор в процесі нагрівання імпульсом струму змінює свою температуру, то буде змінюватись його потужність. Це, в свою чергу, буде впливати на величину

температури розігріву термістора. На рис. А.2 Додатку А наведено графіки залежності середнього значення потужності термістора при його саморозігріві на в діапазоні 12°C...16°C. Цей діапазон температури розігріву термістора відповідає значенням коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин від 0,1 Вт/мК до 1,0 Вт/м*К. З графіків видно, що якщо температура досліджуваної речовини буде зростати, то середнє значення потужності термістора буде зменшуватися. Це призведе до хибного вимірюваного значення температури саморозігріву термістора і, як наслідок, до похибки вимірювання ТФХ досліджуваної речовини.

Для підвищення точності визначення теплопровідності необхідно враховувати зміну потужності, яка виділяється на термісторі, в залежності від температури досліджуваної речовини.

Для однієї і тієї ж речовини має місце таке співвідношення:

$$\frac{P_T}{P_{поч.}} = \frac{\Delta T_T}{\Delta T_{поч.}}, \quad (2.18)$$

де P_T – середня потужність термістора при температурі досліджуваної речовини T , Вт;

$P_{поч.}$ – середня потужність термістора в діапазоні температур від $T_0+12^\circ\text{C}$...16°C, Вт;

ΔT_T – температура розігріву термістора при температурі досліджуваної речовини T ;

$\Delta T_{поч.}$ – температура розігріву термістора при мінімальній температурі діапазону вимірювання досліджуваної речовини.

Наведене співвідношення необхідно використовувати при визначенні температури розігріву термістора.

2.4.3 Залежність температури розігріву термістора від параметрів вимірювального мосту

Із формул (2.15-2.17) отримано числове значення розбалансування мосту на виході АЦП вимірювальної установки, що визначається як:

$$\begin{aligned}
N_{АЦП} &= U_{АЦП} \frac{N_{АЦП \max}}{U_{АЦП \max}} = \frac{N_{АЦП \max}}{U_{АЦП \max}} \frac{R_{C1}}{R_{C1} + R_{C2}} U_{\alpha} = \frac{N_{АЦП \max}}{U_{АЦП \max}} \frac{R_{C1}}{R_{C1} + R_{C2}} (-K_{\alpha}) U_M = \\
&= \frac{-K_{\alpha} N_{АЦП \max} R_{C1}}{U_{АЦП \max} (R_{C1} + R_{C2})} (U_T - \frac{U_i}{2}) = \\
&= \frac{-K_{\alpha} N_{АЦП \max} R_{C1}}{2U_{АЦП \max} (R_{C1} + R_{C2})} U_i \left(1 - 2R_M \frac{\exp \frac{B}{T_{25}}}{R_M \exp \frac{B}{T_{25}} + R_{25} \exp \frac{B}{T}} \right)
\end{aligned} \quad (2.19)$$

де $N_{АЦП}$ – вимірне числове значення розбалансування вимірювального мосту, у.о.;

$U_{АЦП}$ – напруга на вході АЦП, В;

$N_{АЦП \max}$ – максимальне числове значення на виході АЦП, у.о.;

$U_{АЦП \max}$ – максимальна напруга на вході АЦП, В.

U_i – амплітуда імпульсу, В;

$-K_{\alpha}$ – коефіцієнт підсилення підсилювача;

R_{C1} і R_{C2} – опори діляника напруги на виході підсилювача, Ом;

R_M – постійні опори вимірювального мосту, Ом;

U_a – напруга на виході підсилювача, В;

U_M – напруга в діагоналі вимірювального мосту, В;

U_m – напруга на термісторі, В;

T_{25} – температура 298,15 К, при якій нормується опір термістора R_{25} ;

R_{25} – опір термістора при температурі 298,15°C (характеристика термістора), Ом;

B – технологічний коефіцієнт, К.

В результаті математичного перетворення (2.19), одержимо:

$$\exp \frac{B}{T} = \frac{2R_M \exp \frac{B}{T_{25}}}{R_{25}} \frac{1}{\frac{2N_{АЦП} U_{АЦП \max} (R_{C1} + R_{C2})}{K_{\alpha} N_{АЦП \max} R_{C1} * U_i} + 1}, \quad (2.20)$$

або [102]

$$T = \frac{1}{\frac{B}{\ln \frac{R_m}{R_{25}} \left(\frac{U_i N_{AЦП \max} R_{C1} (K_\alpha + 1) - 2 N_{AЦП} U_{AЦП \max} (R_{C1} + R_{C2})}{U_i N_{AЦП \max} R_{C1} (K_\alpha - 1) - 2 N_{AЦП} U_{AЦП \max} (R_{C1} + R_{C2})} \right) - \frac{1}{298,15}}} - 273,15. \quad (2.21)$$

На рис. 2.13 наведено графік залежності $T=f(N_{AЦП})$ при таких значеннях параметрів вимірювального каналу:

$B = 3450, \text{ К}; R_m = 1,12 \text{ кОм}; R_{25} = 2 \text{ кОм}; T_{25} = 298,15 \text{ К}; R_{C1} = 4,02 \text{ кОм}; R_{C2} = 18,7 \text{ кОм}; U_{AЦП \max} = 2,5 \text{ В}; K_\alpha = 8,48; N_{AЦП \max} = 2^{12} = 4096; U_i = 12 \text{ В}.$

З отриманого графіка видно, що ця залежність є близькою до лінійної. Апроксимуючою лінійною функцією є пряма, що проходить через найменше значення діапазону температур (значення на виході АЦП $N_{AЦП}=0$) та точку, яка за розрахунками відповідає значенню температури $+40^\circ\text{C}$ (значення на виході АЦП $N_{(+40)}=1394,1$). Тут представлено залежності температури розігріву термістора від відповідного числового значення на виході АЦП, що отримано за формулою (2.21) та за апроксимуючою прямою.

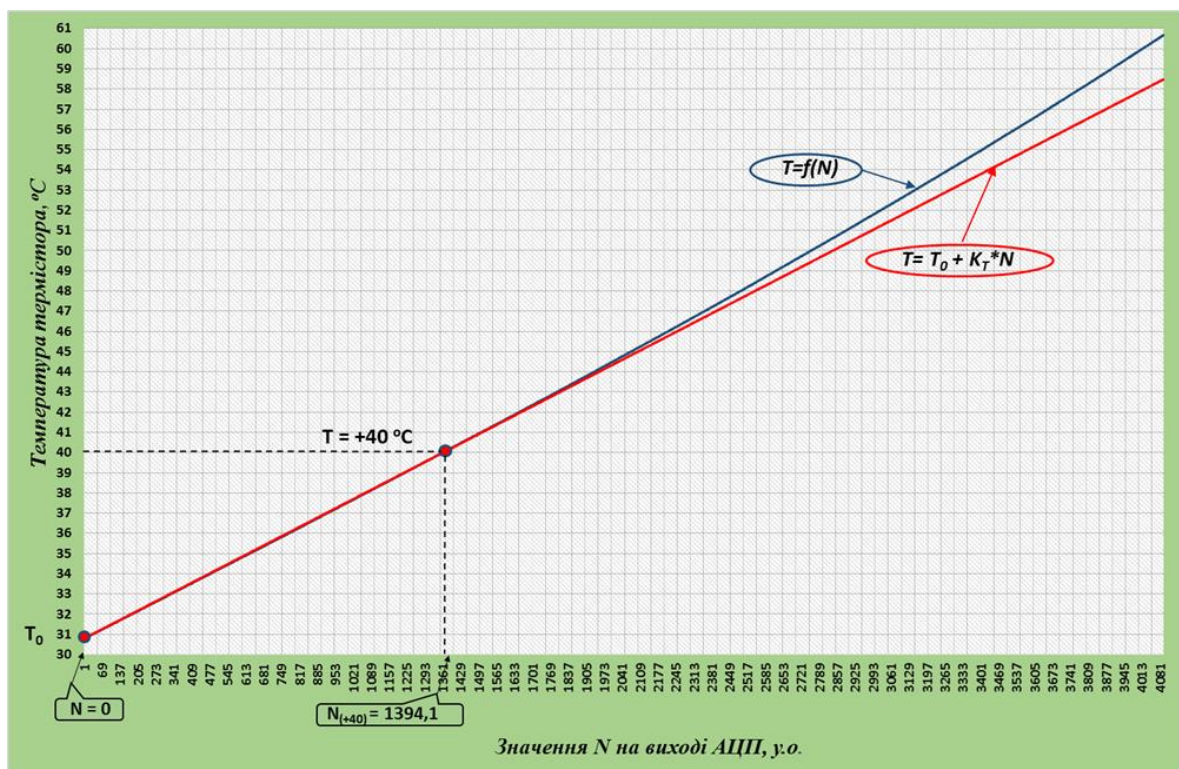


Рис. 2.13. Графіки залежностей температури розігріву термістора від числових значень на виході АЦП.

Функція $T=f(N_{\text{АЦП}})$ є близькою до лінійної в діапазоні температур від $+30^{\circ}\text{C}$ до $+60^{\circ}\text{C}$. Тому представимо її як $T=T_o+N_{\text{АЦП}}K_T$ та визначимо похибку такої заміни.

При заміні функції $T=f(N_{\text{АЦП}})$ лінійною $T=T_o+N_{\text{АЦП}}K_T$ температура вимірювання буде дорівнювати:

$$T = T_o + K_T N_{\text{АЦП}}, \quad (2.22)$$

де T_o – температура розігріву термістора, при якій $N_{\text{АЦП}}=0$, K ;

K_T – тангенс кута нахилу функції $T = T_o + N_{\text{АЦП}} K_T$.

Термограма розігріву термістора протягом дії імпульсу приведена на рис. 2.14.

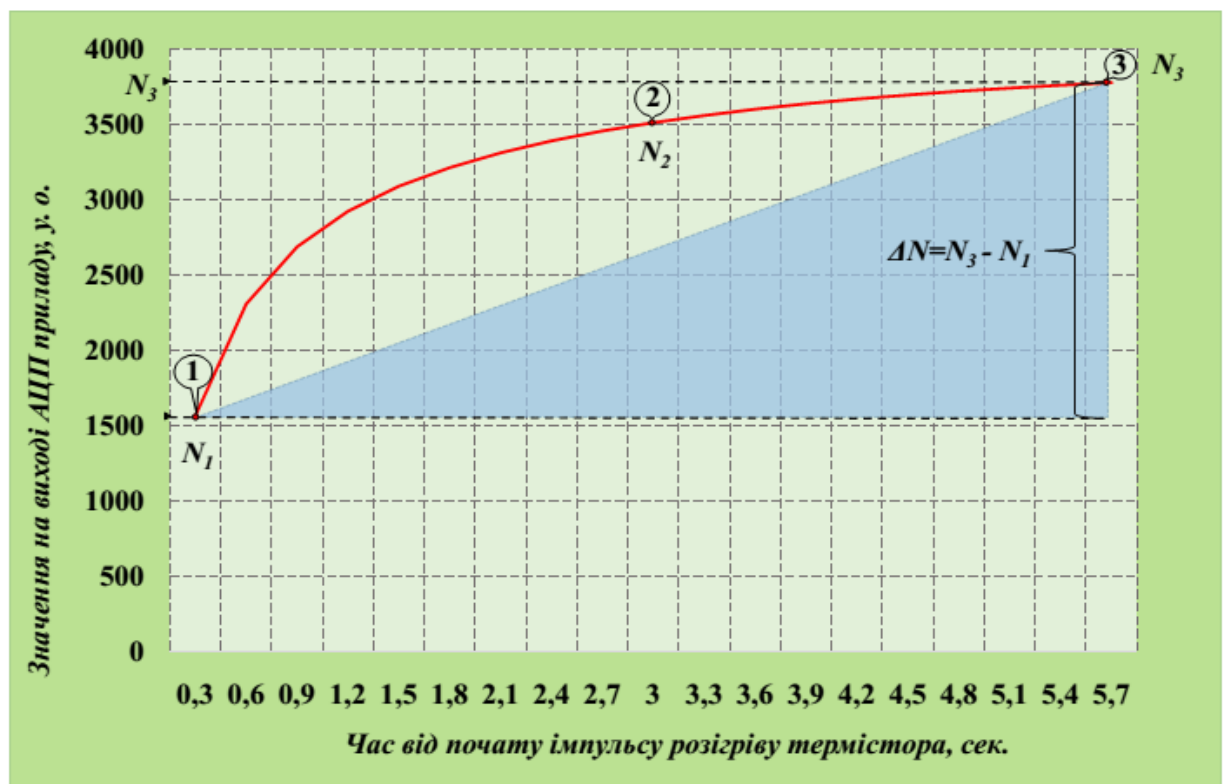


Рис. 2.14. Термограма розігріву термістора.

На даній термограмі точка 1 відповідає початковій точці розігріву термістора (числове значення на виході АЦП – N_I), точка 2 – середині імпульсу розігріву термістора (числове значення на виході АЦП – N_2), точка 3 – кінцевій точці розігріву термістора (числове значення на виході АЦП – N_3).

Тоді температуру розігріву термістора можна обчислити за формулою

$$\Delta T = (N_3 - N_1) K_T, \quad (2.23)$$

де N_3 – кінцева точка розігріву термістора на термограмі;

N_1 – початкова точка розігріву термістора на термограмі.

Для порівняння розбіжності функції $T = f(N_{\text{АЦП}})$, що отримана в результаті розрахунків, та лінійної $T = T_o + N_{\text{АЦП}} K_T$, побудовано графіки цих функцій (рис. 2.15)

$$\Delta T_{\Delta} = f(N_{\text{АЦП}}) - (T_o + N_{\text{АЦП}} K_T).$$

На рис 2.15 також наведено графік, що враховує зміну потужності термістора в залежності від його температури

$$\Delta T_{(P)\Delta} = f(N_{\text{АЦП}}) - (T_o + N_{\text{АЦП}} K_T) - f(P_t)$$

при середній температурі розігріву термістора $\approx +14^\circ\text{C}$. Відповідно до зміни потужності термістора скореговано графік функції ΔT_{Δ} .

На похибку вимірювання теплопровідності впливає температура досліджуваної речовини. Якщо температура досліджуваної речовини збільшується, то область вимірювання зміщується (значення N_3 та N_1) і вимірне значення $\Delta N = N_3 - N_1$ зменшується. В той же час реальне значення ΔT має бути незмінним, оскільки коефіцієнт теплопровідності досліджуваної речовини не змінюється. Для компенсації цієї похибки функцію $T = f(N_{\text{АЦП}})$ замінено лінійною, яка проходить через початок реальної кривої $T = f(N_{\text{АЦП}})$ та точку на графіку, що відповідає значенню температури $+40^\circ\text{C}$. Значення $\Delta N = N_3 - N_1$ скореговано відповідно введенням поправки, яка пропорційна величині зсуву виміряного значення N_1 від значення $N_{(+40)}$. Значення $N_{(+40)}$ є числовим значенням на виході АЦП при температурі термістора $+40^\circ\text{C}$, що обчислене за формулою (2.19). Вимірне значення N_1 є пропорційним температурі досліджуваної речовини.

Треба відзначити також, що початкова точка розігріву термістора, яка залежить від температури досліджуваної речовини і не залежить від потужності термістора та теплофізичних характеристик досліджуваної речовини. В той час кінцева точка розігріву термістора залежить від температури, теплофізичних характеристик досліджуваної речовини та від потужності термістора.

Числові значення корегуючих коефіцієнтів визначаються шляхом тестових досліджень з використанням еталонних речовин з відомими ТФХ.

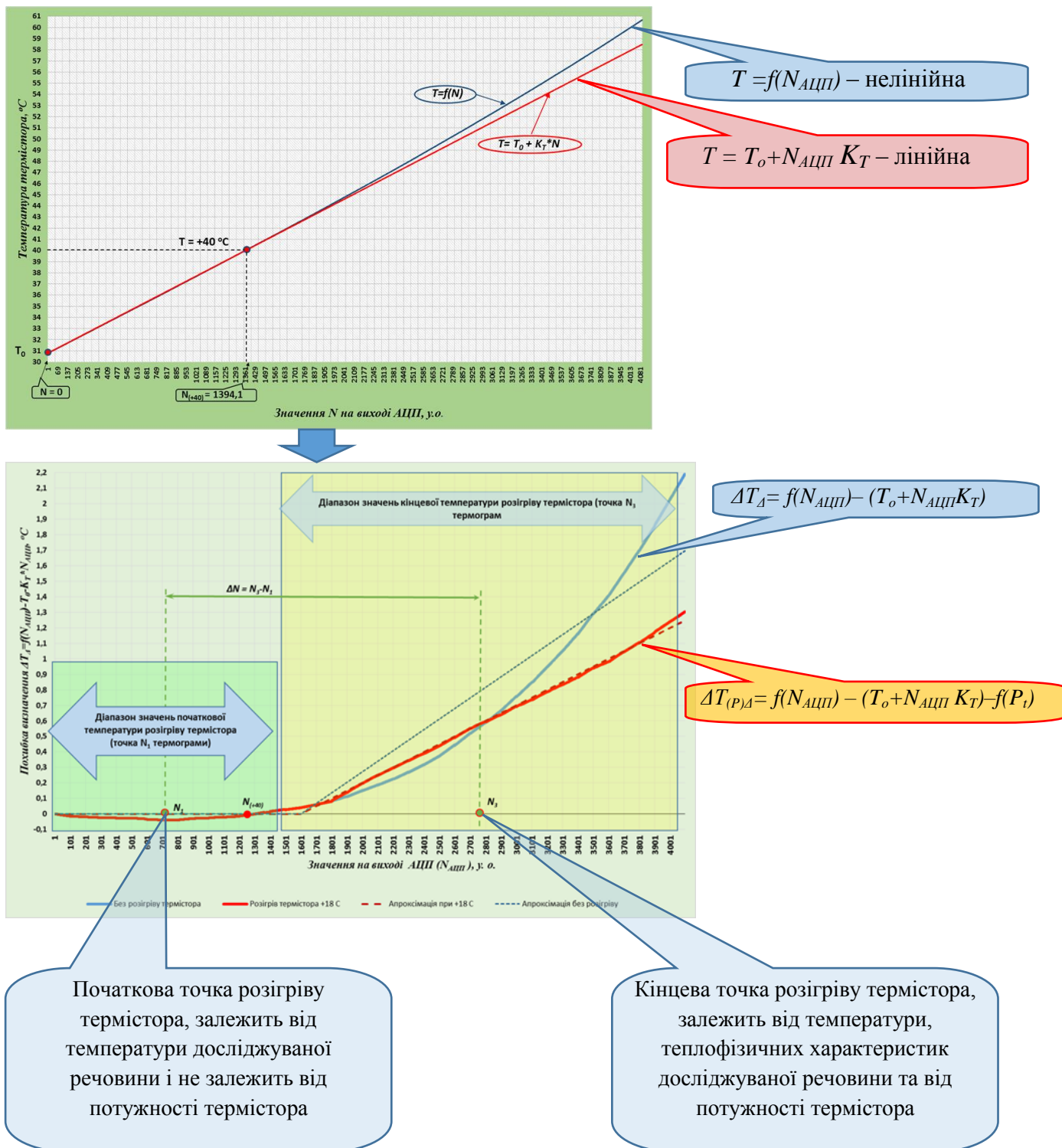


Рис. 2.15. Графіки визначення температури розігріву термістора за даними вимірювання ΔT .

2.5 Математична модель визначення теплопровідності речовин за даними термограми

Коефіцієнт теплопровідності є фізичним параметром речовини, що характеризує її здатність проводити теплоту. Він визначається як [10, 101]:

$$\lambda = \frac{|q|}{|\text{grad}T|}, \quad (2.24)$$

Коефіцієнт теплопровідності λ чисельно дорівнює кількості тепла, що проходить за одиницю часу через одиницю ізотермічної поверхні за умови, що температурний градієнт $\text{grad} T=1$. Його розмірність Вт/(м*К).

Необхідною умовою при застосуванні методу прямого підігріву термістора є розв'язання диференційного рівняння теплопровідності [10, 101, 103]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right) \frac{1}{r} \right), \quad (2.25)$$

де T – температура зонда, °С;

τ – тривалість імпульсу, сек.;

r – радіус кульки термістора, м;

α – коефіцієнт температуропровідності, м²/с, що визначається за формулою [10, 101, 103]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C}, \quad (2.26)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м*К);

ρ – густина досліджуваної речовини, кг/м³;

C – питома теплоємність речовини, Дж/кг*К.

Потужність P_T , яка виділяється термістором при його нагріванні, є сталою [10, 101, 103]:

$$P_T = 2\pi r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \text{const}. \quad (2.27)$$

Спрощена формула розв'язання диференційного рівняння для

термісторного зонду, що має форму кульки, прийме такий вигляд [103]:

$$T = \left(\frac{P_T}{4\pi r \lambda} \right) \left(\frac{\ln 4\alpha T}{r^2} - \gamma \right), \quad (2.28)$$

де $\gamma=0,5772$ – стала Ейлера.

Оскільки для досліджуваного матеріалу коефіцієнт теплопровідності невідомий, тоді його необхідно визначити за формулою [85, 101, 104-106]:

$$\lambda = \frac{P_t}{4\pi r \Delta T}, \quad (2.29)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваної речовини, Вт/(м*К);

P_T – потужність термістора, Вт;

r – радіус термістора, м;

ΔT – температура розігріву термістора, К.

Подібний метод визначення ТФХ речовин застосовується при вимірюванні методом нагрітої нитки [10]. Але на відміну від нитки термістор вкритий захисною оболонкою переважно із скла або епоксидної смоли. Ці матеріали мають коефіцієнт теплопровідності 0,3–0,5Вт/(м*К), тому створюють додатковий тепловий опір на шляху розігріву термістором досліджуваної речовини. Якщо теплопровідність досліджуваної речовини досить мала в порівнянні з теплопровідністю оболонки, то цей фактор майже не впливає на значення температури розігріву термістора. При умові, якщо теплопровідність досліджуваного матеріалу дорівнює або більша від значення теплопровідності оболонки термістора то це приводить до додаткового саморозігріву термістора. Даний факт підтверджується даними вимірювання. Графіки залежностей коефіцієнта теплопровідності від температури розігріву термістора, що побудовані за формулою (2.28) та за даними вимірювань, приведені на рис. 2.16 [101].

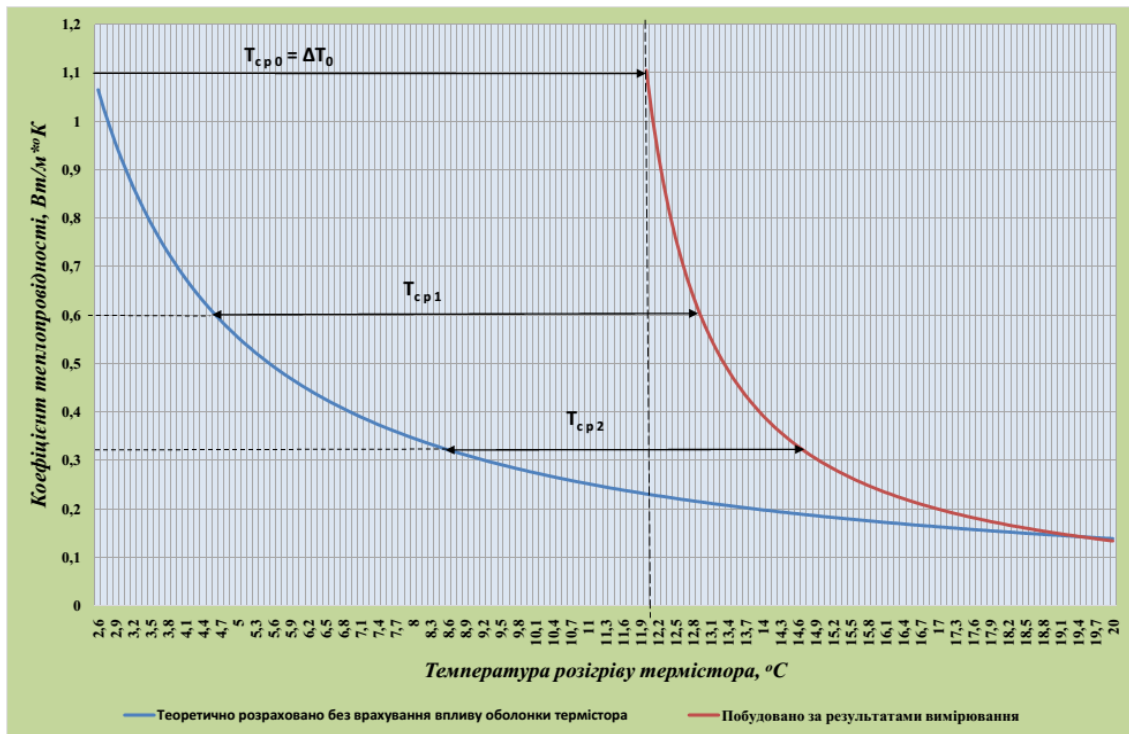


Рис. 2.16. Графіки залежностей коефіцієнта теплопровідності від температури розігріву термістора.

Результати проведених досліджень показали, що термістор, внаслідок наявності захисної оболонки, додатково саморозігрівається. Температура додаткового саморозігріву складає $T_{c\,p}$, причому $T_{c\,p1} > T_{c\,p2}$ (рис. 2.16). Цей факт пояснюється тим, що при зменшенні теплопровідності досліджуваної речовини вплив наявності захисної оболонки зменшується. За наведеними графіками (рис. 2.16) можна оцінити значення коефіцієнта теплопровідності оболонки термістора якщо температура додаткового саморозігріву $T_{c\,p}$ буде дорівнювати температурі розігріву кристалу термістора.

Наведене вище обумовлює необхідність введення в розрахункові формули додаткових коефіцієнтів пропорційності, які визначаються шляхом експериментальних досліджень еталонних речовин з відомими ТФХ, а вираз для визначення коефіцієнта теплопровідності з врахуванням цих обставин набуває вигляду [101, 102]:

$$\lambda_{o.p.} = \frac{P_T K_0}{4\pi r (\Delta T_{\epsilon} - \Delta T_0)}, \quad (2.30)$$

де $\lambda_{\partial.p.}$ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваної речовини, Вт/м*К;

P_T – потужність термістора, Вт;

r – радіус оболонки термістора, м;

ΔT_{ϵ} – виміряна температура розігріву термістора, °С;

ΔT_0 – температура саморозігріву термістора, що визначена за результатами тестів з використанням еталонних речовин, °С. Саморозігрів термістора викликаний наявністю оболонки;

K_0 – коефіцієнт пропорційності, який визначається за результатами досліджень з використанням еталонних речовин. Він характеризує чутливість термістора до значення теплопровідності досліджуваної речовини, яка його оточує.

Коефіцієнт пропорційності K_0 визначається за формулою [102]:

$$K_0 = \frac{(\Delta T_{em.2\epsilon} - \Delta T_{em.1\epsilon})}{(\Delta T_{em.2p} - \Delta T_{em.1p})}, \quad (2.31)$$

де $\Delta T_{em.2\epsilon}$ та $\Delta T_{em.1\epsilon}$ – значення температури розігріву термістора, що визначені за результатами досліджень з використанням еталонних речовин відповідно з найменшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад, 96% розчин етилового спирту ($\Delta T_{em.2\epsilon}$) та найбільшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад, дистильованої води ($\Delta T_{em.1\epsilon}$);

$\Delta T_{em.2p}$ та $\Delta T_{em.1p}$ – розраховані за формулою (2.29) значення температури розігріву термістора для еталонних речовин відповідно з найменшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад, 96% розчин етилового спирту ($\Delta T_{em.2p}$) та найбільшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад, дистильованої води ($\Delta T_{em.1p}$).

Температура саморозігріву термістора ΔT_0 , що викликана наявністю оболонки, визначається за формулою:

$$\Delta T_0 = \Delta T_{em.2\epsilon} - \frac{(\Delta T_{em.2\epsilon} - \Delta T_{em.1\epsilon})\Delta T_{em.2p}}{(\Delta T_{em.2p} - \Delta T_{em.1p})}, \quad (2.32)$$

На основі дослідження теплопровідності з отриманням термограм розігріву термістора можна стверджувати, що значення тривалості імпульсу розігріву у

вигляді числових значень на виході АЦП пропорційні напрузі розбалансування вимірювального мосту, а значить і температурі термістора. Вважаючи, що залежність $T = f(N_{АЦП})$ є лінійною, то значення температури розігріву термістора визначається як:

$$\Delta T_{\epsilon} = (N_{3\epsilon} - N_{1\epsilon}) K_T, \quad (2.33)$$

де ΔT_{ϵ} – визначене значення температури розігріву термістора за вимірними даними;

$N_{3\epsilon}$ – вимірне числове значення в кінцевій точці розігріву термістора за термограмою, що отримано в результаті вимірювання;

$N_{1\epsilon}$ – вимірне числове значення в початковій точці розігріву термістора за термограмою, що отримано в результаті вимірювання;

K_T – тангенс кута нахилу функції $T = T_0 + N_{АЦП} K_T$, що визначається за графіком залежності температури термістора T від числових значень розбалансування вимірювального мосту $N_{АЦП}$, та дорівнює:

$$K_T = \frac{T_{(+40)} - T_0}{N_{(+40)}}, \quad (2.34)$$

де $T_{(+40)}$ – температура розігріву термістора, що дорівнює $+40^\circ\text{C}$;

T_0 – температура розігріву термістора, при якій $N_{АЦП} = 0$;

$N_{(+40)}$ – числове значення на виході АЦП при температурі розігріву термістора $+40^\circ\text{C}$, що обчислене за формулою (2.19).

Тоді формула (2.30) матиме такий вигляд:

$$\lambda_{\partial.p.} = \frac{P_T K_0}{4\pi r ((N_{3\epsilon} - N_{1\epsilon}) K_T - \Delta T_0)}, \quad (2.35)$$

або

$$\lambda_{\partial.p.} = \frac{P_T K_0}{4\pi r \left((N_{3\epsilon} - N_{1\epsilon}) \frac{T_{(+40)} - T_0}{N_{(+40)}} - \Delta T_0 \right)}, \quad (2.36)$$

В наслідок того, що функція $T = f(N_{АЦП})$ насправді є нелінійною, тому для збільшення точності визначення $\lambda_{\partial.p.}$ необхідно ввести поправки. Значення цих поправок буде залежати від температури досліджуваного зразка до початку його

нагрівання, тобто на початку імпульсу розігріву. Враховуючи те, що зазвичай в довідниках значення теплопровідності речовин в залежності від температури наведено з кроком в 5°C , а термостат налаштований на підтримання температури зразка $+40^{\circ}\text{C}$ і розрахунки значення $\lambda_{\text{д.р.}}$ виконано при температурі середовища $+40^{\circ}\text{C}$. Корегування вимірних значень проводились в залежності від різниці значень $\Delta N_{1\text{с}} = N_{(+40)} - N_{1\text{с}}$.

Тоді формула для розрахунку коефіцієнта теплопровідності (2.36) буде мати такий вигляд:

$$\lambda_{\text{д.р.}} = \frac{P_T K_0}{4\pi r \left(\left((N_{3\text{с}} - N_{1\text{с}}) - (N_{(+40)} - N_{1\text{с}}) K_{II} \right) \frac{T_{(+40)} - T_0}{N_{(+40)}} - \Delta T_0 \right)}, \quad (2.37)$$

де K_{II} – корегуючий коефіцієнт, який визначається шляхом тестування еталонних речовин з відомими ТФХ.

Формула (2.37) дійсна для випадку, коли термісторні зонди мають однакові електричні та теплофізичні характеристики. Але реальні характеристики різних термісторних зондів відрізняються, тому в формулу (2.37) необхідно ввести корегуючі коефіцієнти, які компенсують різницю в характеристиках термісторів.

З врахуванням цього влосконалена формула для визначення коефіцієнта теплопровідності за допомогою i -го термісторного зонду за даними вимірювання набуде наступного вигляду [102]:

$$\lambda_{\text{д.р.}i} = \frac{P_T K_0}{4\pi r \left(\left((N_{3\text{с}i} - N_{1\text{с}i}) - (N_{(+40)} - K_{ni} N_{1\text{с}i}) K_{Pi} \right) K_{\kappa i} \frac{T_{(+40)} - T_0}{N_{(+40)}} - \Delta T_0 \right)}, \quad (2.38)$$

де $\lambda_{\text{д.р.}i}$ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваної речовини, що визначений по даним вимірювання i -го термісторного зонду;

$N_{3\text{с}i}$ – вимірне числове значення в кінцева точці розігріву термістора за термограмою, що отримане в результаті вимірювання i -го термісторного зонду;

$N_{1\text{с}i}$ – вимірне числове значення в початковій точці розігріву термістора на термограмою, що отримана в результаті вимірювання i -го термісторного зонду;

K_{ni} – коефіцієнт, що корегує похибку вимірювання i -м термістором температури досліджуваного зразка;

K_{Pi} – коефіцієнт, що корегує залежність значення вимірної i -м термістором різниці $N_{3\text{в}i} - N_{1\text{в}i}$ від температури досліджуваного зразка;

K_{ki} – коефіцієнт, що корегує чутливість i -го термістора (виконує компенсацію похибки значення вимірної i -м термістором різниці $N_{3\text{в}i} - N_{1\text{в}i}$ до середньостатистичного значення).

2.6. Визначення корегуючих коефіцієнтів

Коефіцієнти K_{ni} , K_{Pi} , K_{ki} визначаються індивідуально для кожного термістора окремо в ході калібрувальних процедур з використанням еталонних речовин з відомими ТФХ. Ці коефіцієнти є характеристиками термісторного зонда. Коефіцієнти ΔT_o , K_o визначаються теж за даними калібрувальних тестувань з використанням в якості досліджуваних еталонних речовин з відомими ТФХ. Але ці величини визначаються як середнє значення для всіх зондів.

Для визначення цих коефіцієнтів виконують вимірювання термограм розігріву щонайменше двох еталонних речовин з відомими коефіцієнтами теплопровідності. Для забезпечення максимальної точності визначення числових значень корегуючих коефіцієнтів, значення коефіцієнтів теплопровідності еталонних речовин мають значно відрізнятися. Вимірювання проводяться, використовуючи одну еталонну речовину для всієї множини пробірок контейнера. При цьому кожне вимірювання супроводжують повним перезавантаженням контейнера для виключення похибок, які виникають в наслідок неточного їх дозування та похибок, що пов'язані з відхиленням геометричних розмірів пробірок. Ці вимірювання проводять в процесі нагрівання за допомогою термостата контейнера з моменту досягнення його температури не нижче $+32^\circ\text{C}$ сеансами по 10 хвилин.

Для обчислення коефіцієнта K_{ni} використовують дані сеансу вимірювання для еталонної речовини. Цей коефіцієнт визначаються як:

$$K_{ni} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m N_{1ei}}{N_{1ei}} \right)_j, \quad (2.39)$$

N_{1ei} – вимірне числове значення в початковій точці розігріву термістора на термограмою, що одержане в результаті вимірювання i -го термісторного зонду;

m – кількість термісторних зондів;

n – кількість термограм за сеанс дослідження.

Для обчислення K_{ki} використовують дані вимірювання одного сеансу однієї з еталонних речовин. Коефіцієнт K_{ki} визначаються як середнє значення відношення:

$$K_{ki} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (N_{3ei} - N_{1ei})}{(N_{3ei} - N_{1ei})} \right)_j, \quad (2.40)$$

N_{3ei} – вимірне числове значення в кінцевій точці розігріву термістора на термограмою, що одержане в результаті вимірювання i -го термісторного зонду.

Для обчислення K_{Pi} використовуються дані вимірювання двох сеансів вимірювання однієї з еталонних речовин за умови, що дані сеанси вибираються з проведених двогодинних сеансів таким чином, щоб температура досліджуваної речовини в одному із них була мінімальною а в іншому максимальною. Критерієм для визначення мінімальної та максимальної температури є середнє значення N_{1e} за сеанс вимірювання (значення в початковій точці, яке пропорційне температурі досліджуваної речовини).

Коефіцієнт K_{Pi} визначаються як середнє значення відношення:

$$K_{Pi} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (N_{3ei \min} - N_{1ei \min})}{(N_{3ei \min} - N_{1ei \min})} - \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (N_{3ei \max} - N_{1ei \max})}{(N_{3ei \max} - N_{1ei \max})}}{\frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m (N_{1ei \max} - N_{1ei \min})} \right)_j, \quad (2.41)$$

де $N_{1\text{в}i \text{ min}}$ – вимірне числове значення в початковій точці розігріву термістора на термограмою, що одержане в результаті вимірювання i -го термісторного зонду при мінімальній температурі досліджуваного зразка впродовж n сеансів вимірювання;

$N_{3\text{в}i \text{ min}}$ – вимірне числове значення в кінцевій точці розігріву термістора на термограмою, що одержане в результаті вимірювання i -го термісторного зонду при мінімальній температурі досліджуваного зразка впродовж n сеансів вимірювання;

$N_{1\text{в}i \text{ max}}$ – вимірне числове значення в початковій точці розігріву термістора на термограмою, що одержане в результаті вимірювання i -го термісторного зонду при максимальній температурі досліджуваного зразка впродовж n сеансів вимірювання;

$N_{3\text{в}i \text{ max}}$ – вимірне числове значення в кінцевій точці розігріву термістора на термограмою, що одержане в результаті вимірювання i -го термісторного зонду при максимальній температурі досліджуваного зразка впродовж n сеансів вимірювання.

Для обчислення K_o та ΔT_o використовуються дані вимірювання сеансів вимірювання двох еталонних речовин, причому значення коефіцієнтів теплопровідності еталонних речовин мають значно відрізнятися. Коефіцієнти K_o та ΔT_o визначаються відповідно за формулами 2.31 та 2.32.

Значення $\Delta T_{em.1 \text{ в}i}$ та $\Delta T_{em. 2 \text{ в}i}$ для i -го термісторного зонду визначаються наступним чином:

$$\Delta T_{em.1\text{в}i} = ((N_{3em.1\text{в}i} - N_{1em.1\text{в}i}) - (N_{(+40)} - K_{ni} N_{1em.1\text{в}i}) * K_{Pi}) * K_{ki} \frac{T_{(+40)} - T_0}{N_{(+40)}}, \quad (2.42)$$

$$\Delta T_{em.2\text{в}i} = ((N_{3em.2\text{в}i} - N_{1em.2\text{в}i}) - (N_{(+40)} - K_{ni} N_{1em.2\text{в}i}) * K_{Pi}) * K_{ki} \frac{T_{(+40)} - T_0}{N_{(+40)}}, \quad (2.43)$$

де K_{ni} , K_{Pi} , K_{ki} – корегуючі коефіцієнти, що попередньо визначені в ході тестування еталонних речовин; $N_{3em.1\text{в}i}$ – вимірне числове значення в кінцевій точці розігріву термістора за термограмою, що одержане в результаті вимірювання i -го термісторного зонду першої еталонної речовини;

$N_{3em.26i}$ – вимірне числове значення в кінцевій точці розігріву термістора за термограмою, що одержане в результаті вимірювання i -го термісторного зонду другої еталонної речовини;

$N_{Iem.16i}$ – вимірне числове значення в початковій точці розігріву термістора за термограмою, що одержане в результаті вимірювання i -го термісторного зонду першої еталонної речовини;

$N_{Iem.26i}$ – вимірне числове значення в початковій точці розігріву термістора за термограмою, що одержане в результаті вимірювання i -го термісторного зонду другої еталонної речовини.

Значення $\Delta T_{em.2p.}$ та $\Delta T_{em.1p.}$ розраховуються за формулами:

$$\Delta T_{em.2p.} = \frac{P_T}{4\pi r \lambda_{em.2}}, \quad (2.44)$$

$$\Delta T_{em.1p.} = \frac{P_T}{4\pi r \lambda_{em.1}}, \quad (2.45)$$

де $\lambda_{em.1}$, $\lambda_{em.2}$ – відомі з довідників коефіцієнти теплопровідності першої та другої еталонних речовин при температурі $+40^\circ\text{C}$, Вт/м*К;

P_T – потужність термістора, Вт;

r – радіус термістора, м;

$\Delta T_{em.1p.}$ та $\Delta T_{em.2p.}$ – розраховані за формулами температури розігріву термістора для першої та другої еталонних речовин відповідно, $^\circ\text{C}$.

Запропонована математична модель на відміну від існуючих, враховує умови розповсюдження теплової енергії від чутливого елемента при вимірюванні температури досліджуваного зразка, зміну потужності термістора в процесі його нагрівання і чутливість термісторного зонду до значення теплопровідності досліджуваної речовини.

Вдосконалено метод контролю складу речовин при визначенні їх теплопровідності на основі використання покращеної математичної моделі та вимірної величини саморозігріву термістора у методі його прямого підігріву.

Висновки до розділу

1. Встановлено, що контроль складу речовини доцільно виконувати шляхом визначення її теплопровідності на основі ефекту саморозігріву термістора в досліджуваному середовищі.

2. Вдосконалено математичну модель, яка на відміну від існуючих, враховує умови розповсюдження теплової енергії від чутливого елемента при вимірюванні температури досліджуваного зразка, зміну потужності термістора в процесі його нагрівання і чутливість термісторного зонду до значення теплопровідності досліджуваної речовини.

3. Вдосконалено метод контролю складу речовин при визначенні їх теплопровідності на основі використання покращеної математичної моделі та вимірної величини саморозігріву термістора у методі його прямого підігріву.

4. Для вимірювання ТФХ речовин в якості чутливого елемента використано термістор Mitsubishi – «Thermistor-simulation», а саме термістор RH16, у якого на ділянці падіння напруги вольт-амперної характеристики зменшення опору є більшим в порівнянні зі збільшенням струму. На цій ділянці спостерігається ефект саморозігріву термістора електричним струмом, який залежить від ТФХ навколишнього середовища. При цьому ступінь розігріву термістора використовується для визначення теплопровідності речовин.

5. Представлена структурна схема вимірювального каналу, в одне із плечей якого включений термістор, а сам вимірювальний міст збалансований при $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це дозволило за числовими значеннями на виході АЦП, що пропорційні напрузі розбалансування моста, отримати термограму для визначення температури розігріву термістора під дією імпульсу струму, а за цими даними – теплопровідність досліджуваної речовини в діапазоні від 0,1 до 2,0 Вт/м*К для визначення їх складу.

РОЗДІЛ 3.

РОЗРОБКА ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ РЕЧОВИН ЗА ЇХ ТЕПЛОПРОВІДНІСТЮ ТА ЙОГО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

На основі вдосконаленого методу визначення складу речовин через визначення величини теплопровідності розроблено дослідний стенд для апробації математичної моделі, що підтвердило можливість застосування методу прямого підігріву термістора для вимірювання теплопровідності рідких речовин.

На основі отриманих результатів апробації дослідного стенду для визначення теплопровідності речовин створено багатоканальний прилад. При розробці цього приладу з метою підвищення точності вимірювання теплопровідності, зменшення дії дестабілізуючих факторів, автоматизації процесу вимірювання та виконання розрахунків і збільшення кількості вимірювальних зондів удосконалено (в порівнянні з конструкцією дослідного стенду) електричну схему вимірювального каналу та загальну електричну схему всього приладу. Розроблена програма керування процесом дослідження та програма аналізу даних вимірювань, які дають змогу визначати склад речовин на основі їх теплофізичних характеристик та забезпечують зручність проведення процедури вимірювання. Наведено результати експериментальних досліджень з застосуванням розробленого приладу для визначення теплопровідності різноманітних речовин.

Структура розробленого приладу захищена патентом України на винахід за №113044 від 25.11.2016 [95].

3.1. Структура стенду для вимірювання теплопровідності речовин

Для проведення досліджень з визначення теплопровідності речовин створено стенд [107], електрична схема якого приведена на рис. Б.1 Додатку Б. Він забезпечує вимірювання теплопровідності з використанням термістора в діапазоні температур від $+30^{\circ}\text{C}$ до $+60^{\circ}\text{C}$. Такий діапазон температур зумовлений необхідністю дослідження речовин без руйнування їх хімічної структури та зміни властивостей. Для забезпечення стабільної температури досліджуваного зразка в

стенді використано термостат, який підтримує температуру досліджуваного зразка в діапазоні від $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ з точністю $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Структурна схема дослідного стенду для вимірювання теплопровідності речовин представлена на рис. 3.1.

Представлена структурна схема дослідного стенду має два термістори (зонди) для визначення ТФХ речовини, що забезпечує кращу достовірність результатів досліджень. В наведеній схемі кожний із термісторів ввімкнений в одне із плечей двох вимірювальних мостів Уїтстона. Сигнали розбалансування мостів підсилюється в 10 разів диференційними підсилювачами. Кожний підсилювач складається із трьох операційних підсилювачів. На вхід опорної напруги диференційного підсилювача подається опорна напруга $U_{\text{жив}} = +5\text{В}$ з виходу помножувача опорної напруги. В якості опорної служить напруга внутрішнього джерела АЦП $U_{\text{жив}} = +2,5\text{В}$. Оскільки в стенді є два вимірювальних канали, то використано два диференційні підсилювачі, виходи яких підключені до входу АЦП через мультиплексор. Максимальна напруга на виході диференційного підсилювача дорівнює 10 В, а максимальна напруга на вході мультиплексора складає 5В. Тому сигнал з виходу диференційних підсилювачів ділиться на 2 дільником напруги на резисторах. Також на два входи мультиплексора подається через дільники опорна напруга +5В та напруга живлення вимірювального мосту +10В і таким чином контролюється дрейф опорної напруги та напруги живлення вимірювального мосту.

Сигнали з виходів диференційних підсилювачів, опорна напруга та напруга живлення вимірювального мосту по чергово підключається до входу АЦП. Дані з виходу АЦП записуються у внутрішню пам'ять мікроконтролера та по інтерфейсу RS-232C передаються до ПК, де зберігаються в вигляді текстового файлу. Мікроконтролер дослідного стенду під час процедури вимірювання формує сигнал керування ключем подачі імпульсу напруги живлення на вимірювальний міст і подає відповідні сигнали керування на мультиплексор для перемикання входу АЦП до відповідного сигналу. Імпульс напруги живлення вимірювального мосту формується за допомогою транзисторного ключа, який живиться від стабілізатора напруги $+10\text{В} \pm 1\%$.

За допомогою програмного забезпечення, що встановлене на ПК, здійснюється аналіз вимірюваних сигналів. Отримані дані використовуються для визначення ТФХ досліджуваних речовин.

За програмою статистичного аналізу проводяться розрахунки для кожного із вимірювальних каналів і визначаються необхідні коефіцієнти для корегування даних вимірювання. Ці величини постійно уточнюються по мірі накопичення нових даних. Збільшення масиву даних при статистичній обробці дозволяє підвищити достовірність визначення математичного очікування та дисперсії результатів дослідження ТФХ.

За допомогою дослідного стенду проведено дослідження для перевірки адекватності вдосконаленої математичної моделі, вибрано оптимальний режим нагріву/охолодження термістора та визначено оптимальний об'єм досліджуваної речовини [83, 108]. Детально результати досліджень приведені в розділі 4.1.

3.2. Функціональна схема приладу

На основі аналізу проведених досліджень, одержаних за допомогою дослідного стенду, розроблено багатоканальний прилад для вимірювання теплопровідності рідких речовин [102], функціональна схема якого наведена на рис. 3.2.

В наведеній схемі прийнято такі позначення: ВБ – вимірювальний блок; Б – буфер; М – мікроконтролер; МР – мультиплексор; ДП – диференційний підсилювач; ВМ – вимірювальний модуль; 1...8 – вимірювальні зонди; КР – контейнер; Т – термостат; НЕ – нагрівальний елемент; РН – регулятор напруги; ДТ – датчик температури; П – підсилювач; БК – блок керування; ПДПК – порт датчиків положення контейнера; ДД – драйвер двигуна; І – індикатор; БЖ – блок живлення; ДБЖ – джерело безперебійного живлення; ПК – персональний комп'ютер.

Прилад має такі основні конструктивні елементи:

- шість вимірювальних блоків (ВБ), що конструктивно об'єднані в один вимірювальний модуль (ВМ);
- блок керування приладом (БК);
- термостат, в який встановлюється контейнер з досліджуваними зразками;
- блок живлення приладу (БЖ) з використанням зовнішнього джерела безперебійного живлення (ДБЖ).

Кожний із шести вимірювальних блоків має по 10 вимірювальних зондів, які занурюються в досліджувану речовину. Кожний вимірювальний зонд конічної форми з термістором на вістрі ввімкнений в одне із плечей вимірювального мосту, сигнал розбалансування якого підсилюється диференційним підсилювачем і подається через мультиплексор на 12-ти розрядний аналого-цифровий перетворювач. Числові значення розбалансування всіх 10-ти вимірювальних мостів з виходу АЦП по чергово запам'ятовується мікроконтролерами кожного вимірювального блоку, які після закінчення імпульсу розігріву термістора передаються до мікроконтролера блоку керування.

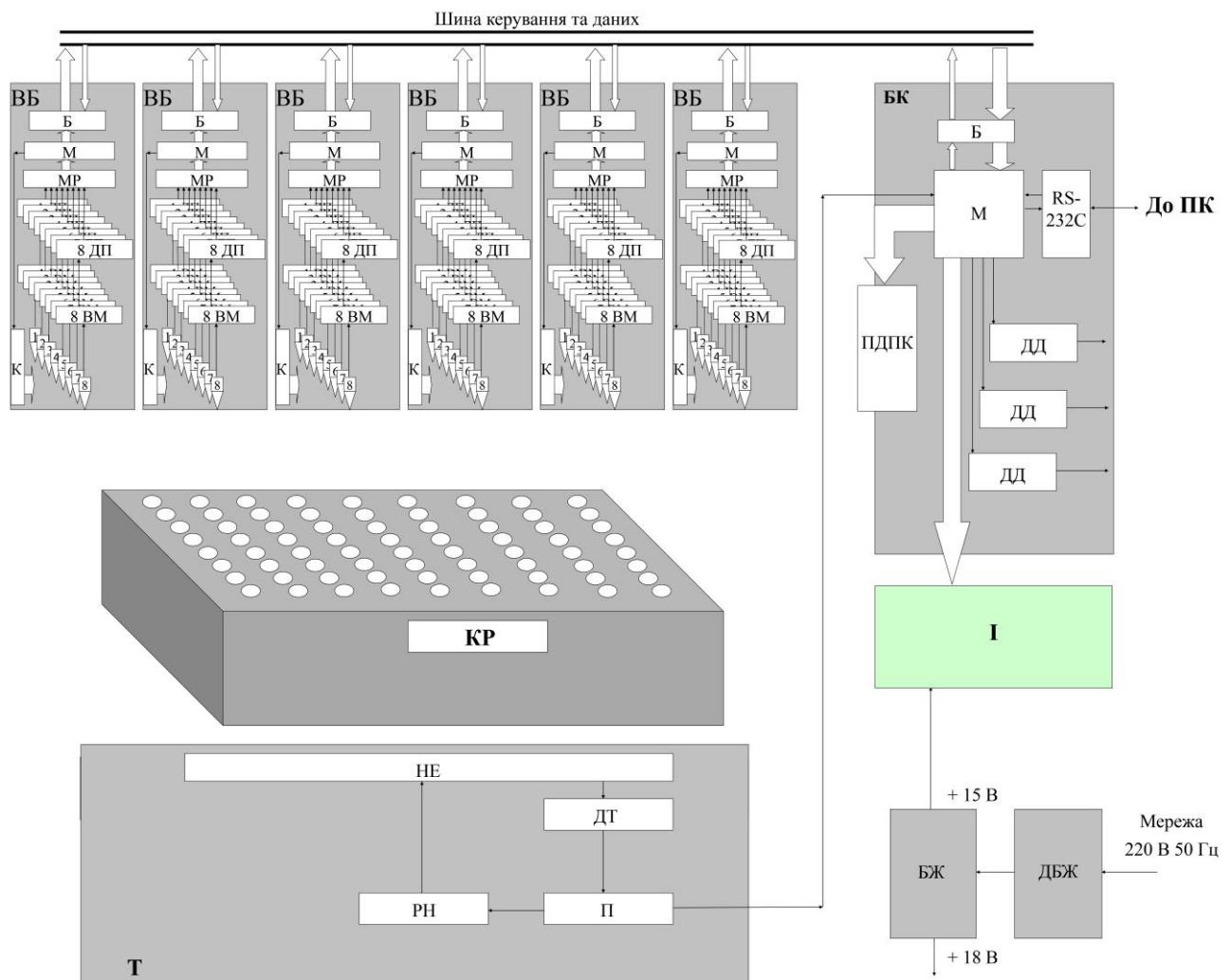


Рис. 3.2. Функціональна схема приладу.

Живлення вимірювального мосту здійснюється від джерела опорної напруги постійного струму $+12 \text{ В} \pm 2\%$. Значення напруги вибрано таким чином, щоб забезпечити роботу термістора на ділянці падіння напруги вольт-амперної характеристики, де зменшення опору більше ніж відносно збільшення струму.

Ввімкнення живлення вимірювального мосту здійснюється за сигналом від мікроконтролера на час, який дорівнює постійній часу термістора. При ввімкненні ключа на вимірювальний міст подається напруга, в результаті цього термістор нагрівається. Тривалості імпульсу достатньо для того, щоб виміряти температуру саморозігріву термістора, на яку впливає ТФХ середовища, що оточує термістор. Результат розігріву термістора протягом тривалості імпульсу заноситься в

пам'ять мікроконтролера. Після цього витримується пауза для охолодження термістора протягом 20 секунд.

Дані, після закінчення сеансу вимірювання, з мікроконтролера за командою блоку керування передаються до ПК в вигляді файлу даних .

Контейнер з пробірками, що заповнені досліджуваною речовиною, розміщується в термостаті приладу для забезпечення постійної температури зразків. Він нагрівається до температури $+40 \pm 0,5$ °C. Потужність нагрівача термостата регулюється датчиком температури контейнера за допомогою регулятора напруги. Живлення вузлів приладу забезпечується блоком живлення, який підключений до мережі змінного струму 220 ± 20 В 50 Гц через джерело безперебійного живлення.

Поточний стан приладу та температура контейнера з досліджуваними зразками відображається на індикаторі. Положення вимірювального модулю та термостата контролюється за допомогою датчиків (кінцевих вимикачів) для запобігання можливості механічного пошкодження зондів при переміщенні термостата.

3.3. Електрична схема приладу

Принципова електрична схема багатоканального приладу для вимірювання теплопровідності речовин представлена на рис. Б.1 Додатку Б.

При розробці цієї схеми враховано такі конструктивні особливості приладу:

- для зменшення впливу дестабілізуючих факторів, що впливають на похибку вимірювання, при розробці електричної схеми дотримано вимоги підприємств-виробників ЕРЕ щодо застосування схем їх підключення;

- розділено ланцюги живлення елементів, які можуть створювати в них перешкоди імпульсного та флуктуаційного характеру (електродвигуни, потужні споживачі енергії тощо), та ланцюги живлення вимірювальних каналів з включенням в них додаткових фільтруючих елементів

Згідно з рис. Б.2 Додатку Б вимірювальні блоки А1–А6 мають роз'єм для підключення напруги живлення Р2 та роз'єм для зв'язку з блоком керування Р1. Окрім цього, кожний вимірювальний блок має додатковий роз'єм для підключення адаптера при програмуванні мікроконтролера блоку та перемикачі, за допомогою яких встановлюється код номера блоку в касеті вимірювального модулю згідно схеми їх розташування. Це необхідно для розпізнання блоком керування приладу даних вимірювання, що одержані від різних вимірювальних блоків. Контакти роз'ємів Р1 всіх вимірювальних блоків та роз'єму Р4 блока керування з'єднані паралельно, формуючи таким чином шину обміну даними. Блок керування по чергову передає до кожного із вимірювальних блоків команди для зчитування з них даних вимірювання. Живлення напругою +15 В подається на вимірювальні блоки від окремого джерела А11–2 блоку живлення А11. Це відокремлює вторинні ланцюги живлення різних блоків приладу для зменшення рівня завад в ланцюгах живлення.

Блок керування приладу здійснює загальне керування роботою приладу, одержуючи команди від ПК. БК забезпечує зчитування даних вимірювання з вимірювальних блоків в процесі проведення тестувань та передавання їх до ПК після закінчення процедури дослідження.

Для візуальної індикації режимів роботи приладу він має РК-індикатор А7, що розміщений на передній панелі приладу. Рядом з РК-індикатором розташована панель керування вимірювальним модулем. За допомогою клавіш S1 та S2 вимірювальний модуль піднімається або опускається в зону вимірювання. Таким чином, при опусканні вимірювального модулю зонди занурюються в досліджувану речовину, а при підйомі – картридж вивільнюється від зондів і може бути виведений із зони проведення дослідження. Контроль за положенням вимірювального модуля здійснюється за допомогою кінцевих вимикачів S3 та S4, а термостата – за допомогою вимикача S5. У випадку, якщо модуль та термостат не знаходяться в відповідних положеннях, неможливо опустити вимірювальний модуль та розпочати процедуру вимірювання. Це застерігає від механічних пошкоджень зондів при неправильному взаємному розташуванні вимірювального

модуля та термостата та забезпечує вимірювання тільки при повному зануренні зондів в досліджувану речовину. Візуальний контроль за положенням вимірювального блоку здійснюється за світлодіодами D1 та D2. Підйом та опускання вимірювального модуля здійснюється механізмом підйому, який приводиться в дію реверсивним електродвигуном постійного струму з планетарним редуктором M1. Роботою двигуна керує мікроконтролер блоку керування за допомогою драйвера, який встановлений на платі блока керування. Його виходи для підключення електродвигуна виведені на роз'єм P19. Виводи «+» та «-» електродвигуна з'єднані з відповідними контактами роз'єму P19. Елементи панелі керування вимірювальним модулем з'єднані шлейфом з відповідним роз'ємом P16 блоку керування. Контакти кінцевих вимикачів S3, S4 та S5 з'єднані з відповідними контактами роз'єму P11 блоку керування.

Термостат в своєму складі має нагрівальний елемент Rн, блок керування термостатом A10-2 та два датчики температури A10-1 та A10-3. Датчики температури приєднані один – до блоку керування приладу, а другий – до блоку керування термостатом. Перший використовується безпосередньо для вимірювання температури блоком керування приладу, значення якої виводиться на РК-індикатор приладу, а другий – для вимірювання температури в ланцюгу зворотного зв'язку «датчик температури A10-2» – «блок контролю термостата A10-2» – «нагрівальний елемент Rн» з метою стабілізації температури досліджуваної речовини. Блок керування термостатом A10-2 з'єднаний з блоком керування приладу (роз'єм P10-2) шиною обміну даними (роз'єм P3). Живлення термостата (роз'єм P10-3) здійснюється від окремого джерела живлення A11-1 блока живлення A11. Враховуючи те, що термостат має переміщуватися по направляючим від вільної зони до зони вимірювання, всі з'єднання здійснені одним плоским шлейфом, таким чином, щоб його довжина повністю забезпечила переміщення термостата.

Блок живлення A11 складається з 4-х окремих джерел живлення: A11-1 – для живлення термостата напругою +24 В; A11-2 – для живлення блоків вимірювання A1-A6 вимірювального модуля напругою +15 В; A11-3 та A11-4 –

відповідно для живлення блоку керування приладу напругою +12 В та +24 В. Вони об'єднані в один блок живлення з встановленими в ньому запобіжниками FU1–FU5, що розташовані на задній стінці приладу. Для освітлення вільної зони приладу та зони вимірювання на корпус шафи з лівої сторони встановлені люмінесцентні світильники EL1 та EL2. При необхідності світло вмикається вимикачем S6.

Мікроконтролер блоку керування пристроєм підтримує з ПК постійний зв'язок, отримуючи від нього відповідні команди, та здійснює передачу на ПК даних вимірювання. Зв'язок з ПК здійснюється за допомогою порту RS232C, роз'єм для підключення якого (X22) розташований на задній панелі приладу.

При необхідності можна легко провести перепрограмування мікроконтролерів як вимірювальних блоків, так і мікроконтролера блока керування приладу. Ця дія виконується для зміни версії програмного забезпечення або для введення корегуючих коефіцієнтів з метою корекції даних вимірювання безпосередньо при дослідженні.

3.4. Опис конструкції приладу

Загальний вигляд створеного приладу наведено на рис. 3.3. Термостат з контейнером, вимірювальний модуль, дозатор і блок управління закріплені на загальному шасі. Ці елементи представлено як єдиний конструктивний вузол, який розміщено в металевій (рис. Б.3 та рис. Б.4 Додатку Б) зі скляними дверцятами.

Корпус приладу (рис. Б.3 Додатку Б) має габаритні розміри 520*600*500 мм. Бічні і задня стінки шафи закриваються окремими металевими панелями, що захищають разом зі скляними дверима зону вимірювання від дії зовнішнього середовища (зовнішнього потоку повітря, що охолоджує зону дослідження).



Рис. 3.3. Загальний вигляд приладу.

Між задньою стінкою корпусу і задньою додатковою перегородкою розташовано блок живлення приладу. На лівій бічній перегородці встановлено ліхтар для освітлення зони вимірювання та зони дозування.

3.4.1. Вимірювальний модуль

Кожний із шести вимірювальних блоків приладу представляється як друкована плата, загальний вигляд якого зображено на рис. 3.4. Він розташований вертикально над контейнером з досліджуваними речовинами.

На друкованій платі вимірювального блоку (рис. 3.4) закріплені десять вимірювальних зондів в один ряд на одній планці. Шість вимірювальних блоків розміщені вертикально на одній рухомій платформі, яка може пересуватися під

дією підйомного механізму по вертикалі і фіксуватися за допомогою спеціальних фіксаторів в нижньому положенні. Рухома платформа разом з 6-ма вимірювальними блоками утворює вимірювальний модуль. Контроль за положенням платформи здійснюється за допомогою кінцевих вимикачів, платформа приводиться в рух за допомогою кнопок на панелі керування вимірювальним модулем, які знаходяться в верхній частині шафи поряд з рідкокристалічним індикатором.

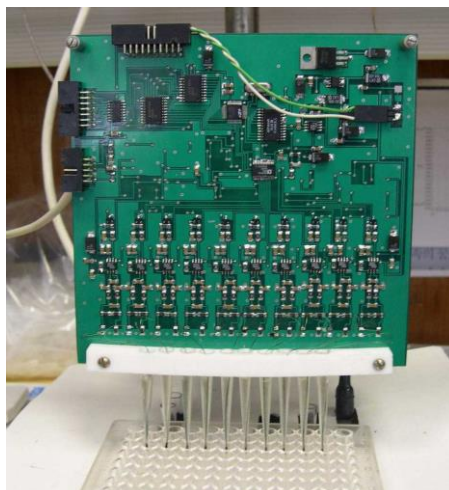


Рис. 3.4. Загальний вигляд вимірювального блока.

Для проведення вимірювань необхідно перемістити в зону вимірювання термостат із вставленим у нього контейнером і опустити вимірювальний модуль вниз за допомогою відповідної кнопки, яка знаходиться на панелі керування вимірювальним модулем.

До кожного з 10-ти вимірювальних зондів у вимірювальному блоці підключені диференціальні входи прецизійного інструментального підсилювача, що підсилює вимірювальний сигнал. До кожного з вимірювальних мостів подається опорна напруга через аналоговий ключ. Вимірювальний зонд, міст, прецизійний інструментальний підсилювач і аналоговий ключ утворюють один вимірювальний канал, яких у вимірювальному блоці 10, а всього у вимірювальному модулі їх є 60. Сигнал з виходу кожного з каналів по чергово через мультиплексор подається на вхід 12-ти розрядного АЦП.

Мікроконтролер вимірювального блоку видає сигнали керування на аналоговий ключ кожного з вимірювальних каналів, мультиплексор і АЦП, а також надає команду на зчитування та запис даних вимірювань у внутрішню пам'ять приладу.

Кожен з вимірювальних блоків має свій порядковий номер, який відповідає його місцю в касеті вимірювального модуля.

Керування роботою вимірювальних блоків здійснює БК, який через інтерфейс RS-232C з'єднаний з зовнішнім персональним комп'ютером. За командою від блоку керування вимірювальні блоки розпочинають процедуру вимірювання, після закінчення якої здійснюється по чергове зчитування даних вимірювань з мікроконтролерів відповідних блоків. На адресній шині блок керування по чергове виставляє адресу одного з 6-ти вимірювальних блоків. Вимірювальний блок, адреса якого співпадає з прийнятою по шині адресою, передає виміряні дані в пам'ять мікроконтролера блоку керування. Тільки після завершення процедури зчитування даних з відповідного вимірювального блоку блок керування змінює адрес на адресній шині та розпочинає аналогічну процедуру зчитування даних з наступного вимірювального блоку.

На рис. 3.5 схематично зображено елементи вимірювального каналу – вимірювальний міст, підсилювач, мультиплексор, АЦП, мікроконтролер та графіки залежності значень розбалансування моста на виході АЦП від температури розігріву термістора в діапазоні від $+30^{\circ}\text{C}$ до $+60^{\circ}\text{C}$ значень, відповідно: напруги на термісторі; напруги розбалансування мосту; напруги на вході АЦП; числового значення на виході АЦП, в у.о.

Залежність числового значення на виході АЦП від температури при розрахунках коефіцієнта теплопровідності корегується шляхом введення відповідних коефіцієнтів.

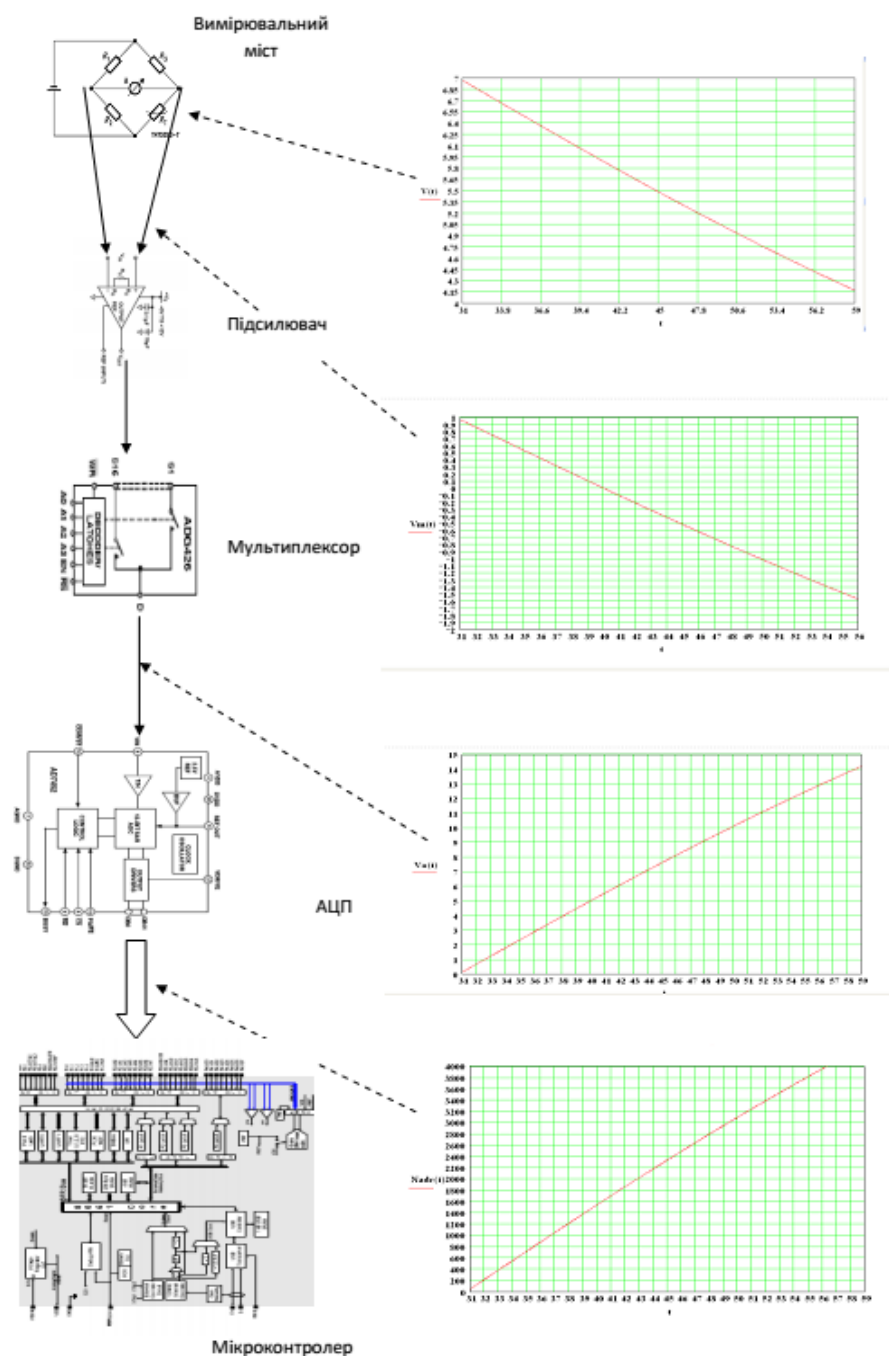


Рис. 3.5. Схеми елементів вимірювальних каналів та відповідні їм вихідні характеристики.

3.4.2. Блок керування

Блок керування здійснює керування роботою вимірювальних блоків, процесом зчитування і попередньою обробкою даних, що отримані від вимірювальних блоків вимірювального модуля, передачею цих даних в зовнішній ПК по інтерфейсу RS-232C, а також отримує сигнали керування з зовнішнього ПК.

Блок керування складається з мікроконтролера, буфера шини даних і керування, інтерфейсу RS–232C, каналу керування двигунами постійного струму і двох портів для підключення датчиків розташування вимірювального модуля і контейнера з досліджуваними зразками.

З зовнішнього ПК надходить команда на запуск процедури вимірювання, що передається до вимірювальних блоків. Після закінчення сеансу вимірювання мікроконтролер блоку керування накопичує дані вимірювань з вимірювальних блоків, виконує попередню їх обробку і передає в зовнішній ПК. Для цього мікроконтролер має FLASH-пам'ять об'ємом 128 кбайт.

Блок керування (рис. 3.6) представлено в вигляді друкованої плати, що вмонтована за лівою бічною панеллю приладу. Він з'єднаний з вимірювальним модулем і термостатом гнучким шлейфом, який дозволяє переміщувати термостат в горизонтальній і у вертикальній площинах.

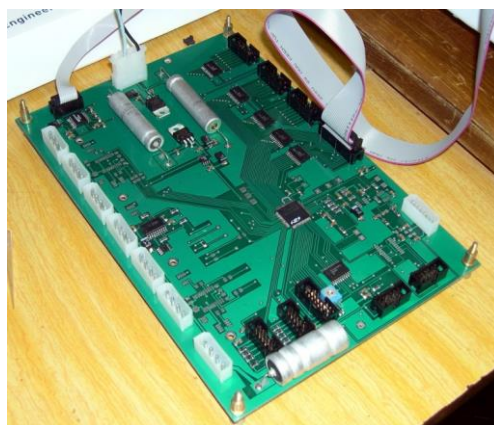


Рис. 3.6. Загальний вигляд блоку керування.

Мікроконтролер блоку керування за допомогою внутрішнього АЦП перетворює аналоговий сигнал, який вимірюється датчиком температури термостата, в цифрове значення температури та передає його на РК-індикатор.

3.4.3. Контейнер з досліджуваними зразками

Контейнер з досліджуваними зразками призначений для розміщення та підготовки дослідних речовин до вимірювання [109, 110].

Контейнер, зовнішній вигляд якого зображено на рис. Б.5 Додатку Б, виготовлений з алюмінієвого сплаву. В ньому є поглиблення для встановлення одноразових пробірок з досліджуваними речовинами.

3.4.4. Термостат

Коефіцієнт теплопровідності досліджуваних речовин залежить від їх температури, тому важливим є підтримання температури досліджуваної речовини незмінною протягом сеансу вимірювання. З цією метою контейнер з досліджуваними зразками розміщується в термостаті, який підтримує його температуру в необхідному діапазоні [109, 110].

Зовнішній вигляд термостата з встановленим в ньому контейнером показано на рис. 3.7, а зовнішній вигляд термостата без контейнера – на рис. 3.8.



Рис. 3.7. Загальний вигляд термостата з контейнером.

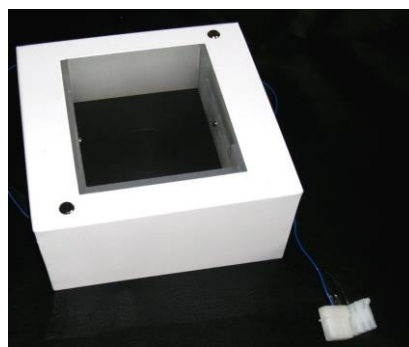


Рис. 3.8. Загальний вигляд термостата без контейнера.

Термостат закріплений на горизонтально рухомій платформі в корпусі приладу. Це необхідно для розміщення контейнера в фіксованому положенні в зоні проведення вимірювань.

На бічній стінці поглиблення термостату встановлено датчик температури контейнера. Це підпружинена капсула рис. Б.6 Додатку Б, в яку вмонтовано термістор серії RH16 з номінальним опором 10 кОм (при +25°C). Датчик безпосередньо контактує з контейнером і вимірює його температуру. Перевищення заданої температури досліджуваної речовини призводить до падіння напруги на термісторі. Ця різниця підсилюється та подається на

регулятор напруги, який знижує потужність нагрівача. Максимальна напруга, що подається на нагрівач складає 24 В. Регулятором напруги є лінійний регульований стабілізатор.

Підсилювач і датчик температури встановлено на платі регулятора, яка закріплена за вертикальною стінкою поглиблення для контейнера в термостаті. Плата (рис. Б.7 Додатку Б) встановлена на корпусі нагрівача. З підсилювача сигнал, що пропорційний температурі термістора, подається на мікропроцесор блоку керування, де виконується аналого-цифрове перетворення, а числове значення температури – виводиться на індикатор.

Термостат з'єднаний з блоком керування гнучким шлейфом, який вкладається в нішу основи корпусу приладу. Це дозволяє переміщувати термостат в горизонтальній площині.

3.4.5 Блок живлення приладу

Блок живлення призначений для забезпечення джерелами напруги живлення складових елементів приладу. Він розміщений в окремому металевому корпусі і закріплений на задній панелі шафи. На задню стінку приладу встановлено роз'єм джерела живлення та необхідні запобіжники.

Блок живлення містить чотири AC/DC-перетворювачі. Для зменшення взаємних перешкод напруга +15 В подається на вимірювальний модуль, а напруга +24 В – на термостат подаються від окремих AC/DC перетворювачів.

3.5. Математичне і програмне забезпечення системи вимірювання теплопровідності речовин

На основі аналізу даних вимірювання, одержаних за допомогою дослідного стенду та розробленого багатоканального приладу і, відповідно, до розробленої математичної моделі розрахунку теплопровідності речовин, за даними термограм розігріву термістора розроблено відповідний алгоритм дослідження, обробки та аналізу отриманих результатів [111].

Узагальнений алгоритм процесу дослідження наведено на рис. 3.9.

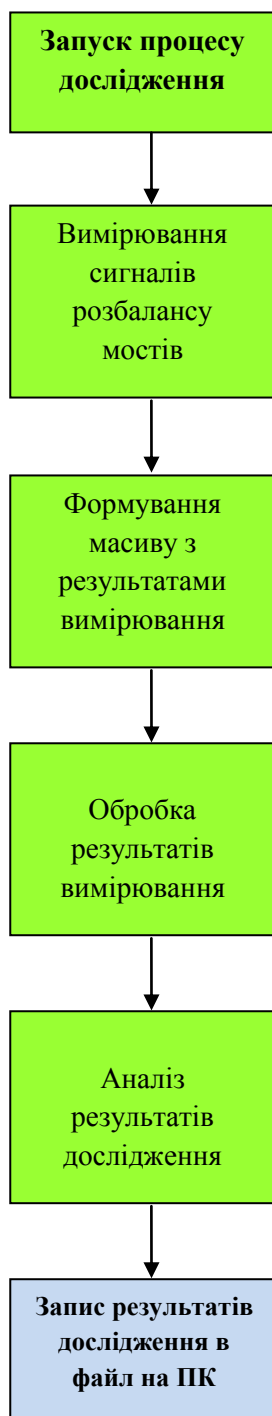


Рис. 3.9. Узагальнений алгоритм процесу дослідження, обробки і аналізу даних вимірювань.

Для реалізації алгоритму досліджень розроблено відповідне програмне забезпечення:

- мікроконтролерів вимірювальних блоків приладу;
- мікроконтролерів блоку керування приладу;

- аналізу даних вимірювань та визначення характеристик досліджуваних речовин за допомогою ПК;
- керування процесом дослідження з ПК.

3.5.1. Алгоритми роботи мікроконтролерів вимірювальних блоків та блоку керування приладом

Керування процесом вимірювання здійснюється за допомогою мікроконтролерів приладу. Керуючим в приладі є мікроконтролер блоку керування, який очікує команди запуску вимірювання від ПК і після її одержання передає команду мікроконтролерам вимірювальних блоків на початок дослідження.

В блоці керування та блоках вимірювання використовуються мікроконтролери компанії SiLabs. Створення програм керування для мікроконтролерів здійснюється за допомогою інтегрованого середовища розробки SiLabs – інструментарію, що призначений для розробки програмного забезпечення на мовах Сі та Асемблера, налагодження та програмування мікроконтролерів.

На рис. Б.8 Додатку Б наведено загальне вікно інтегрованого середовища SiLabs з відкритими вікнами «master» та «slave» для програмування мікроконтролерів блоку керування та вимірювальних блоків.

Алгоритм роботи мікроконтролера блоку керування приладом полягає в виконанні нижче наведених дій.

При ввімкненні приладу блок керування очікує команду ідентифікації приладу від зовнішнього ПК і після її отримання виконує процедуру ідентифікації. За командою запуску процесу дослідження мікропроцесор передає вимірювальним блокам відповідні команди та розпочинає відлік часу від початку вимірювання. Після завершення сеансу дослідження блок керування накопичує дані вимірювання в єдиному файлі і передає його до ПК. З моменту ввімкнення приладу мікроконтролер блоку керування передає на РК-індикатор дані

поточного стану приладу (температура контейнера, режим роботи, аварійні повідомлення тощо).

Алгоритм роботи мікроконтролерів вимірювальних блоків реалізовано в такій послідовності.

При ввімкненні приладу кожний із шести вимірювальних блоків приладу знаходиться в режимі очікування команди запуску процедури вимірювання. Після її одержання від блоку керування приладом мікроконтролер вимірювального блоку подає команду ввімкнення живлення на всі 10 вимірювальних мостів і після цього через 0,3 секунд по чергово від кожного вимірювального каналу проводить запис числових значень розбалансування вимірювального мосту з виходу АЦП до внутрішньої пам'яті. Після закінчення терміну часу розігріву термістора, що складає 6 секунд, мікроконтролер вимикає напругу на вимірювальних мостах на 20 секунд для охолодження термістора. За час його охолодження мікроконтролери вимірювальних блоків здійснюють передачу накопичених даних вимірювання до мікроконтролера блоку керування. Після закінчення терміну часу охолодження термістора процедура вимірювання повторюється. Так продовжується до тих пір, поки не завершиться встановлений термін часу процедури дослідження.

3.5.2. Програма керування процесом дослідження теплопровідності речовин

Для створення програми керування процесом дослідження теплопровідності речовин, що здійснюється з зовнішнього ПК, застосовано пакет *Microsoft Visual C++*, який є інтегрованим середовищем розробки програмного забезпечення на мові *C++*. Програма керування має назву «Analyser50».

Загальний вигляд інтерфейсного вікна пакету *Microsoft Visual C++*, що використано при створенні програми «Analyser50», приведено на рис. 3.10.

Встановлення програми керування приладом «Analyser50» на ПК виконується автоматично за допомогою файлу «Analyser50 setup». Після ініціалізації програми керування створюються відповідні файли в реєстрі та в

системних папках її драйверів. При цьому на екрані ПК з'являється ярлик програми.

При запуску програми на виконання шляхом натискання на її ярлик на дисплеї комп'ютера з'являється вікно програми «Analyser50». Загальний вигляд цього вікна наведено на рис. Б.9 Додатку Б.

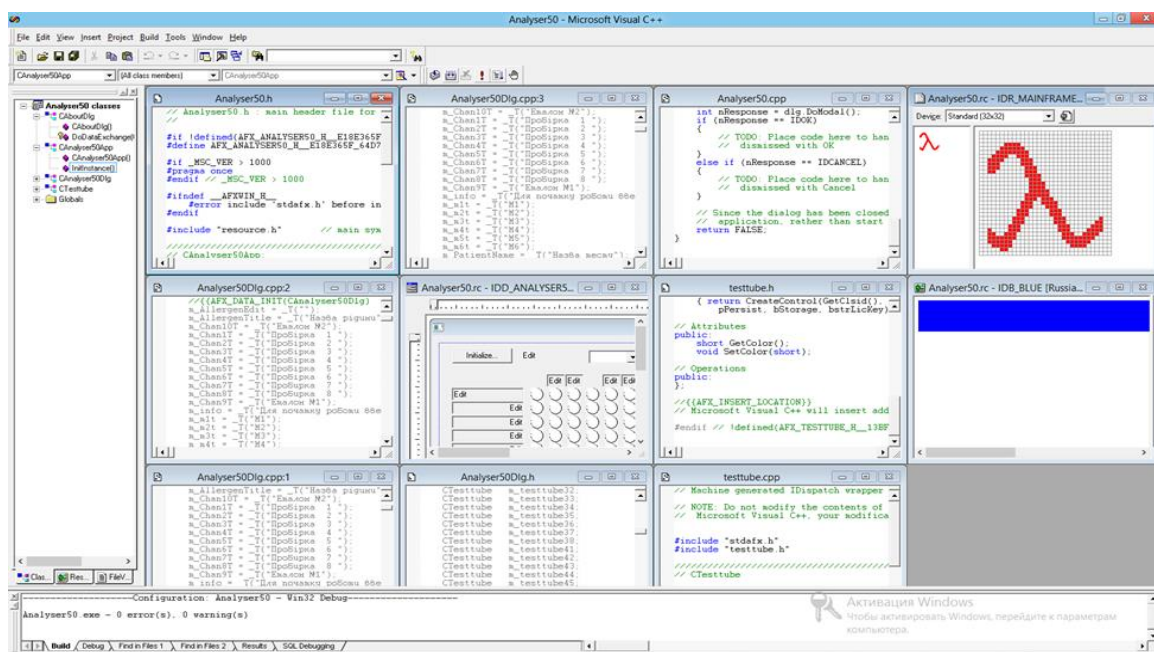


Рис. 3.10. Загальний вигляд інтерфейсного вікна пакету *Microsoft Visual C++* в процесі створення програми «Analyser50».

В вікні програми керування роботи приладом необхідно вибрати порт комп'ютера, до якого під'єднаний прилад, та ввести в відповідні розділи вікна назву тесту та тривалість сеансу дослідження й виконати ініціалізацію приладу. Вікно програми після ініціалізації приладу наведено на рис. 3.11.

Після ініціалізації приладу необхідно ввести назви досліджуваних речовин кожної із пробірок в відповідне поле загального вікна. При введенні назви досліджуваної речовини пробірки її колір змінюється з білого на синій. Вибрана пробірка для заповнення даних позначена зеленим кольором. Пробірки, що не заповнюються та використовуються як запасні у картриджі, позначені червоним та чорним кольорами. Вікно програми після повного введення назв досліджуваних речовин представлено на рис. Б.10 Додатку Б.

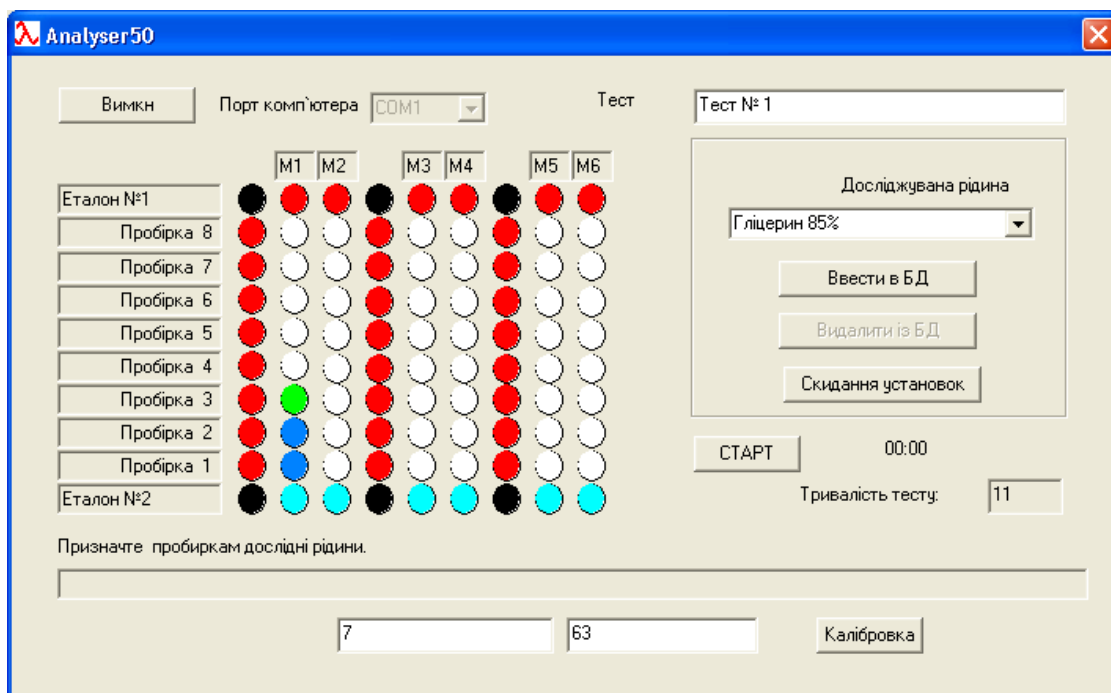


Рис. 3.11. Вікно програми після ініціалізації приладу.

Запуск процесу дослідження здійснюється за допомогою кнопки «СТАРТ» в вікні програми. Про початок дослідження свідчить відповідне повідомлення в вікні програми та зміна кольору пробірок на сірий. Після цього розпочинається відлік часу з початку дослідження та до його закінчення.. Цей відлік часу зображується в нижньому рядку вікна програми. Загальний вигляд вікна програми в процесі дослідження наведено на рис. Б.11 Додатку Б.

Після закінчення процесу дослідження дані вимірювання передаються в ПК й записуються у відповідний файл, а в вікні програми з'являється повідомлення про їх запис в пам'ять ПК.

Вигляд вікна програми при передачі даних дослідження на комп'ютер зображено на рис. Б.12 Додатку Б.

Після закінчення процесу накопичення даних вимірювання та їх передачі на ПК на жорсткому диску створюється файл з назвою, що була введена на початку дослідження. Загальний вигляд інформації, що знаходиться в файлі даних, наведено на рис. 3.12.

160203 Тест № 1 - Excel

ВІД: ☒ Лінійка ☒ Строка формул ☒ Масштаб 100% ☒ Масштаб по виведенню Масштаб

Готово

Рис. 3.12. Загальний вигляд інформації в файлі даних вимірювання.

3.5.3. Програма аналізу даних вимірювань та визначення характеристик досліджуваних речовин

Для аналізу даних вимірювань та обчислення теплопровідності досліджуваних речовин розроблена програма, що має назву «Analyser2015». Визначення теплофізичних характеристик досліджуваних речовин здійснюється за даними файлу результатів дослідження. Ці дані представляють собою значення термограм в умовних одиницях на виході АЦП вимірювального блоку. Вони є пропорційними температурі розігріву термісторних зондів багатоканального приладу протягом сеансу вимірювання.

Головне меню інтерфейсного вікна програми «Analyser2015» складається із таких сторінок:

- «Дані вимірювання» (рис. 3.13);
- «Корегування» (рис. Б.13, Б.14, Б.15 Додатку Б);
- «Розрахунки» (рис. 3.14);
- «Коефіцієнти» (рис. Б.16 Додатку Б);
- «Результати розрахунків» (рис. 3.15);
- «Формування БД» (рис. Б.17 Додатку Б);

– «Звіт» (рис. Б.18 Додатку Б).

При виборі пункту меню «Дані вимірювання» із відповідного файлу результатів вимірювання завантажується числовий масив, що містить виміряні значення розбалансування моста на виході АЦП для кожного термісторного зонду за повний сеанс вимірювання. Загальний вигляд вікна «Дані вимірювання» з введеними даними представлено на рис. 3.13.

Аналізатор 2015 - Excel

ФАЙЛ ГЛАВНАЯ ВСТАВКА РАЗМЕТКА СТРАНИЦЫ ФОРМУЛЫ ДАННЫЕ РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ ВИД ABBYY FineReader 12

А2 : X ✓ fx K3815

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 36 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Дані вимірювання | Корегування | Розрахунки | Коефіцієнти | Результати розрахунків | Формування БД | Звіт

ГОТОВО СРЕДНЕЕ: 2406,992085 КОЛИЧЕСТВО: 1997 СУММА: 4789914,25 75%

Рис. 3.13. Вікно сторінки «Дані вимірювання».

Сторінка головного меню «Корегування» (рис. Б.13, Б14, Б15 Додатку Б) призначена для виведення результатів корегування даних вимірювання, що враховують коливання температури досліджуваних зразків, використовуючи коефіцієнти, що одержані під час дослідження еталонних речовин. Необхідні для розрахунків коефіцієнти вносяться на сторінці «Коефіцієнти». За інформацією цієї сторінки виконується аналіз даних на предмет виявлення значних відхилень значень, що обумовлені різноманітними дестабілізуючими факторами. Тут також представлено графіки коливань даних до та після корегування. В випадку виникнення підозри на неправильне корегування можна поетапно перевірити

правильність виконання розрахунків. На цій сторінці представлено середні значення температури розігріву кожного із термісторів та інтенсивність їх розігріву, що надані в умовних одиницях.

На сторінці «Розрахунки» (рис. 3.14) виконуються розрахунок коефіцієнтів, що застосовуються при визначенні теплопровідності для кожної із досліджуваних речовин.

Formula for $\lambda_{p,i}$:

$$\lambda_{p,i} = \frac{P_T}{4\pi r \left((N_{2\theta} - N_{1\theta}) - (N_{(+40)} - K_{\theta} N_{1\theta}) * K_{\theta} \right) * K_{\theta} \frac{T_{(+40)} - T_0}{N_{(+40)} - \Delta T_0} * \frac{1}{K_0}}$$

| № Зонду | $\frac{\Delta N_i}{N_{2\theta} - N_{1\theta}}$ | $\frac{P_T}{4\pi r}$ | ΔT_0 | K_{θ} | $\frac{(T_{(+40)} - T_0)(N_{(+40)} - \Delta T_0)}{I N_{oc} u.a.}$ | ΔT_i | $\lambda_{p,i}$ |
|---------|--|----------------------|--------------|--------------|---|--------------|-----------------|
| 1 | 1756.572751 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.866652 | 0.618045 |
| 2 | 1755.996134 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8644277 | 0.619373 |
| 3 | 1747.910977 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8051958 | 0.638609 |
| 4 | 1759.459796 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8898025 | 0.611482 |
| 5 | 1758.412966 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8821292 | 0.613847 |
| 6 | 1758.523523 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8629439 | 0.613595 |
| 7 | 1758.063646 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8854351 | 0.612826 |
| 8 | 1753.008839 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8425428 | 0.626344 |
| 9 | 1747.670658 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8034352 | 0.639199 |
| 10 | 1756.557307 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8685388 | 0.618081 |
| 11 | 1761.50639 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.9047958 | 0.606914 |
| 12 | 1771.119932 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.9752246 | 0.586336 |
| 13 | 1761.348172 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.9036001 | 0.607276 |
| 14 | 1755.965559 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8642037 | 0.619443 |
| 15 | 1758.612103 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8895923 | 0.613395 |
| 16 | 1755.038529 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8793963 | 0.614696 |
| 17 | 1759.60921 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8908971 | 0.611146 |
| 18 | 1767.707512 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.9502252 | 0.593479 |
| 19 | 1758.724339 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.884145 | 0.613141 |
| 20 | 1758.888848 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8856197 | 0.612769 |
| 21 | 1752.912887 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8418398 | 0.62657 |
| 22 | 1750.857827 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8267844 | 0.631461 |
| 23 | 1758.646666 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8898405 | 0.613317 |
| 24 | 1760.563626 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8978891 | 0.60901 |
| 25 | 1754.609987 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8547728 | 0.622588 |
| 26 | 1754.796031 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8556357 | 0.622154 |
| 27 | 1753.921479 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8492288 | 0.624197 |
| 28 | 1751.984676 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8350397 | 0.62877 |
| 29 | 1761.480125 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.9046034 | 0.606972 |
| 30 | 1754.649026 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8545588 | 0.622497 |
| 31 | 1758.976954 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8862652 | 0.61257 |
| 32 | 1750.318808 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8228596 | 0.632756 |
| 33 | 1764.817139 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.9285004 | 0.599666 |
| 34 | 1755.624149 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 | 0.007326 | 12.8617025 | 0.620232 |

Рис. 3.14. Вікно сторінки «Розрахунки».

При цьому використовуються дані, що отримані на сторінці «Корегування». Це середні значення температури розігріву кожного із термісторів та інтенсивність їх розігріву, що представлені в умовних одиницях. Для розрахунків використовуються коефіцієнти, що одержані під час дослідження еталонних речовин і використовуються в математичній моделі.

Необхідні для розрахунків параметри та коефіцієнти вносяться на сторінці «Коефіцієнти» (рис. Б.16 Додатку Б), а саме:

P_T – потужність термістора, Вт;

r – радіус термістора, м;

K_{ni} – коефіцієнт, що корегує похибку вимірювання i -м термістором температури досліджуваного зразка;

K_{Pi} – коефіцієнт, що корегує залежність значення виміряної i -м термістором різниці $N_{3ei} - N_{1ei}$ від температури досліджуваного зразка;

K_{ki} – коефіцієнт, що корегує чутливість i -го термістора (виконує компенсацію похибки значення виміряної i -м термістором різниці $N_{3ei} - N_{1ei}$ до середньостатистичного значення).

T_0 – температура розігріву термістора, при якій $N_{АЦП} = 0$;

$N_{(+40)}$ – числове значення на виході АЦП при температурі розігріву термістора $+40^{\circ}\text{C}$, що обчислене за формулою (2.34);

$\frac{P_T}{4 \cdot \pi \cdot r}$ – коефіцієнт пропорційності для розрахунку теплопровідності досліджуваних речовин. Залежить від потужності, яка виділяється на термісторі з врахуванням його радіусу;

ΔT_0 – температура саморозігріву термістора, що визначена за результатами тестів з використанням еталонних речовин, $^{\circ}\text{C}$. Саморозігрів термістора викликаний наявністю оболонки;

K_0 – коефіцієнт пропорційності, який визначається за результатами досліджень з використанням еталонних речовин. Він характеризує чутливість термістора до значення теплопровідності досліджуваної речовини, яка його оточує.

На сторінку «Результати розрахунків» (рис. 3.15) виносяться дані з результатами визначення теплопровідності досліджуваних речовин, що включає:

- назва дослідження, дата і час його проведення;
- досліджувана речовина та порядковий номер пробірки;
- температура при вимірюванні, $^{\circ}\text{C}$;
- коефіцієнт теплопровідності кожної досліджуваної речовини, $\text{Вт/м}^{\circ}\text{C}$.

Вибором сторінки «Формування бази даних» (рис. Б.17 Додатку Б) на екран виводяться запити для формування бази результатів дослідження

теплопровідності речовин. Натисканням відповідної кнопки здійснюється запуск процедури формування бази даних.

Сторінка «Звіт» (рис. Б.18 Додатку Б) містить інформацію для формування заключного звіту про результати проведених досліджень та кнопку на формування цього звіту. Після натискання цієї кнопки буде створено текстовий файл для його подальшого використання.

| Досліджувана рідина (Вимірювальний модуль, Пробірка №) | Температура при вимірюванні, °C | Коефіцієнт теплопровідності λ при температурі +40°C, Вт/м*°K |
|---|------------------------------------|--|
| Дистильована вода (M1, Пробірка 1): | 38.15 | 0.618 |
| Дистильована вода (M1, Пробірка 2): | 38.13 | 0.619 |
| Дистильована вода (M1, Пробірка 3): | 38.12 | 0.639 |
| Дистильована вода (M1, Пробірка 4): | 38.14 | 0.611 |
| Дистильована вода (M1, Пробірка 5): | 38.08 | 0.614 |
| Дистильована вода (M1, Пробірка 6): | 38.18 | 0.614 |
| Дистильована вода (M1, Пробірка 7): | 38.15 | 0.613 |
| Дистильована вода (M1, Пробірка 8): | 38.15 | 0.626 |
| Дистильована вода (M1, Пробірка 9): | 38.20 | 0.639 |
| Дистильована вода (M1, Пробірка 10): | 38.12 | 0.618 |
| Дистильована вода (M2, Пробірка 1): | 38.11 | 0.607 |
| Дистильована вода (M2, Пробірка 2): | 37.46 | 0.596 |
| Дистильована вода (M2, Пробірка 3): | 36.54 | 0.607 |
| Дистильована вода (M2, Пробірка 4): | 38.13 | 0.619 |
| Дистильована вода (M2, Пробірка 5): | 38.15 | 0.613 |
| Дистильована вода (M2, Пробірка 6): | 38.15 | 0.615 |
| Дистильована вода (M2, Пробірка 7): | 38.16 | 0.611 |
| Дистильована вода (M2, Пробірка 8): | 38.18 | 0.599 |
| Дистильована вода (M2, Пробірка 9): | 38.20 | 0.613 |
| Дистильована вода (M2, Пробірка 10): | 38.09 | 0.613 |
| Дистильована вода (M3, Пробірка 1): | 38.10 | 0.627 |
| Дистильована вода (M3, Пробірка 2): | 38.09 | 0.631 |
| Дистильована вода (M3, Пробірка 3): | 38.12 | 0.613 |
| Дистильована вода (M3, Пробірка 4): | 38.14 | 0.609 |
| Дистильована вода (M3, Пробірка 5): | 38.13 | 0.623 |
| Дистильована вода (M3, Пробірка 6): | 38.11 | 0.622 |
| Дистильована вода (M3, Пробірка 7): | 38.15 | 0.624 |
| Дистильована вода (M3, Пробірка 8): | 38.18 | 0.629 |
| Дистильована вода (M3, Пробірка 9): | 38.17 | 0.607 |

Рис. 3.15. Вікно сторінки «Результати розрахунків».

3.5.4. База даних вимірювань

За результатами проведених досліджень теплопровідності речовин формується база даних, що дозволяє накопичувати інформацію з метою подальшої статистичної обробки та аналізу отриманих даних.

Інформація бази даних може використовуватись при розв'язанні задач визначення ТФХ різноманітних речовин.

3.6. Загальна методика проведення досліджень та підготовка зразків досліджуваних речовин

При проведенні досліджень використовувалась дослідний стенд, що має два термісторних зонди та розроблений багатоканальний прилад, який має 60 вимірювальних зондів. Стенд та прилад мають аналогічну схему вимірювальних каналів, тому методика проведення досліджень з їх використанням була однаковою. Методика відрізнялась тільки тим, що при використанні дослідного стенду можна одночасно вимірювати два досліджувані зразки речовини, які розміщуються в термостаті. За допомогою дослідного стенду встановлено раціональні режими роботи приладу, електричні параметри каналу вимірювання та перевірені алгоритми роботи з метою їх використання в багатоканальному приладі.

Послідовність процедури проведення досліджень з визначення теплопровідності речовин представлено на рис. Б.19 Додатку Б.

Згідно з наведеною послідовністю досліджень визначено необхідну кількість та об'єм досліджуваних речовин і їх розташування в картриджі термостата (рис. Б.20 Додатку Б). При цьому витримано всі правила безпеки поводження з речовинами. В залежності від складу та властивостей речовин вибрано дозуючий пристрій (дозатор), який призначений для їх дозування з відповідними властивостями.

Для визначення характеристик термограм розігріву термістора для різних речовин, оптимального режиму «нагрів-охолодження» термістора за характеристиками термограм його розігріву та оптимального об'єму досліджуваної речовини використано дослідний стенд. Результати досліджень, що отримані при використанні дослідного стенду, застосовано при створенні багатоканального приладу.

В дослідженнях при використанні дослідного стенду виконувались вимірювання теплопровідності одночасно двох зразків.

У випадку дослідження неоднорідних речовин, наприклад, сумішей або розчинів, безпосередньо перед проведенням досліджень вони розмішувались та нагрівались до необхідної температури. Ця процедура проводилась за допомогою медичного шейкера [112, 113]. В залежності від властивостей речовин,

встановлювалась тривалість часу проведення розмішування, швидкість обертання шейкера та температура підігріву речовини.

Для підготовки приладу до роботи необхідно виконати таку послідовність дій:

- ввімкнення приладу та ПК;
- запуск програми керування приладом на ПК;
- ініціалізацію роботи приладу та встановлення режиму дослідження;
- введення за допомогою клавіатури назв та характеристик досліджуваних речовин згідно схеми їх розташування.

Після прогрівання приладу протягом 20 хвилин в термостат приладу встановлювався картридж з досліджуваними речовинами та прогрівався в термостаті до температури дослідження протягом 30 хвилин. Контроль за температурою нагрівання проводився за інформацією, яке виводилась на РК-індикатор приладу. При досягненні необхідної температури проводилось вимірювання теплопровідності речовин. Якщо ж досліджувані речовини були неоднорідні і потребували розмішування, в такому випадку нагрітий після процедури розмішування картридж було встановлено в термостат, витримано протягом 5 хвилин для вирівнювання температури і після цього було проведено дослідження.

Далі вимірювальний модуль опускали до повного занурення чутливих елементів в досліджувані речовини. Про повне їх занурення в речовини сигналізував індикатор на панелі керування. Запуск процедури вимірювання було здійснено з вікна керуючої програми.

Після закінчення процедури вимірювання автоматично проводилось зчитування даних вимірювання в файл на ПК. Дані з сформованого файлу переносились в програму обробки результатів. За допомогою програми «Analyser2015» виконувалась обробка даних, їх корекція в залежності від температури, при якій здійснювалось вимірювання, визначались ТФХ кожної із досліджуваних речовин та виводились результати досліджень в відповідне її вікно.

Результати розрахунків заносились в базу даних на ПК.

В залежності від мети проведення досліджень за відповідним алгоритмом проводився аналіз результатів дослідження.

В проведених дослідженнях використовувалися наступні речовини [101, 102]:

- дистильована вода;
- фізіологічний розчин (розчин 0,9% NaCl в дистильованій воді);
- молоко 2,5% жирності;
- 25% розчин етилового спирту в дистильованій воді;
- 60% розчин гліцерину в очищеній воді;
- 80% розчин гліцерину в очищеній воді;
- 85% розчин гліцерину в очищеній воді (Розчин нашкірний 85%, медичний);
- 70% розчин етилового спирту в воді («Септол»);
- 75% розчин етилового спирту в воді;
- етиловий спирт медичний 96–Екстра (96% розчин етилового спирту в воді).

В якості еталонних речовин використано дистильовану воду та 96% розчин етилового спирту в воді.

Перед початком вимірювання проводилась підготовка досліджуваних зразків до роботи. Для цього у всі пробірки наливалась досліджувана речовина по 170 мкл (мінімально необхідний об'єм в пробірці діаметром 8 мм при діаметрі термістора 1,8 мм). При цьому похибка дозування не перевищувала 3%. Досліджувані розчини етилового спирту та гліцерину в дистильованій воді готували безпосередньо перед дослідженням шляхом розчинення однієї речовини в іншій та додатково перед тестуванням підігрівали до необхідної температури й перемішували в медичному шейкері протягом 20 хвилин для отримання однорідного розчину.

Для кожної із досліджуваних речовин вимірювання проводили 10 разів сеансами по 10 хвилин.

Після проведення сеансу вимірювання температуру досліджуваної речовини було визначено за значенням N_I (числового значення напруги розбалансування мосту на виході АЦП в умовних одиницях). Воно відповідає точці 1 термограми розігріву термістора для кожного із зондів і залежить від:

- параметрів термістора, що призводить до похибки вимірювання температури згідно математичної моделі термістора;
- параметрів резисторів в вимірювальному мості;
- теплового контакту між картриджем термостата і пробірною з досліджуваною речовиною;
- розподілу температури по картриджу;
- нелінійної характеристики термістора.

Аналіз даних вимірювання проводили за термограмами розігріву термістора, числові значення яких зберігались в файлах даних вимірювання. Термограма, що побудована за цими даними, приведена на рис. 3.16.

Точка 0 термограми є початком імпульсу розігріву, але, внаслідок встановлених в ланцюгах вимірювального мосту фільтруючих RC елементів, в цій точці виміряне значення помилкове, оскільки перехідний процес в вимірювальному мості ще не закінчився і тому в розрахунках виміряне значення в цій точці не використовувалось.

Точка 1 термограми є початковою точкою термограми. В даний момент термістор не встигає нагрітись під дією імпульсу і тому його температура буде дорівнювати температурі досліджуваного зразка речовини до початку дії імпульсу і не залежить від ТФХ досліджуваної речовини.

Точка 2 термограми є точкою, коли оболонка термістора встигає розігрітись під дією імпульсу.

Точка 3 термограми є кінцевою точкою термограми, коли термістор нагрівся під дією імпульсу. Значення температури розігріву термістора в точці 3 термограми залежить від ТФХ оточуючої термістор досліджуваної речовини.

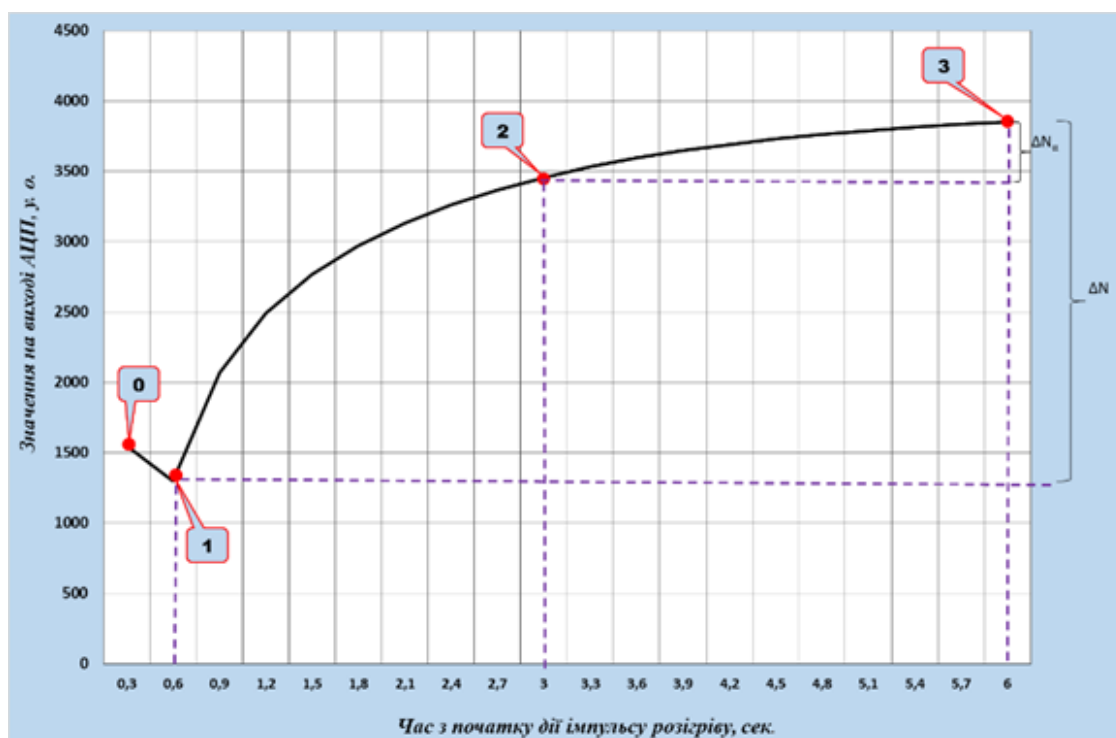


Рис. 3.16. Характерні точки термограми розігріву термістора.

Температура розігріву термістора визначалась за одержаним значенням ΔN (ріницею між значеннями кінцевої і початкової точок термограми).

3.7. Застосування приладу для визначення теплопровідності речовин

За даними вимірювання, одержаними в процесі досліджень за допомогою методики, наведеної в розділі 3.6, визначалися коефіцієнти теплопровідності за формулою (2.38). При обчисленнях використано коефіцієнти пропорційності ΔT_0 та K_0 , що розраховані шляхом контрольних вимірювань температури розігріву термісторів в еталонних речовинах з відомими ТФХ. Визначення коефіцієнтів $K_{ні}$, $K_{Пі}$, $K_{кі}$, які є індивідуальними характеристиками зонду, здійснювалося відповідно за формулами (2.39), (2.40) та (2.41). Детально методика визначення цих коефіцієнтів наведена в розділі 4.2, а їх визначені числові значення наведені в додатку В (таблиці В.1 та В.3). При визначенні корегуючих коефіцієнтів ΔT_0 , K_0 розраховано значення $\Delta N_{АЦП}$, отримано реальні значення ΔT ($\Delta T_{ем.1 \text{ в}}$ та $\Delta T_{ем.2 \text{ в}}$) за формулами (2.42) та (2.43) й виконано порівняння їх значень з теоретично розрахованими за формулами (2.44) та (2.45) ($\Delta T_{ем.1 \text{ р}}$ та $\Delta T_{ем.2 \text{ р}}$) для еталонних

речовин з відомими ТФХ. Розрахунок ΔT_0 , K_0 здійснювався за формулами (2.32) та (2.31). Результати вимірювання $\Delta N_{\text{АЦП}}$ в дистильованій воді ($\lambda = 0,629 \text{ Вт/м}^\circ\text{К}$), в 85% розчині гліцерину та в 96% розчині етилового спирту в воді, $\lambda = 0,174 \text{ Вт/м}^\circ\text{К}$) та результати розрахунку ΔT наведені в таблиці Б.1 Додатку Б.

Залежність коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин від температури розігріву термістора представлена на рис. 3.17 [101].

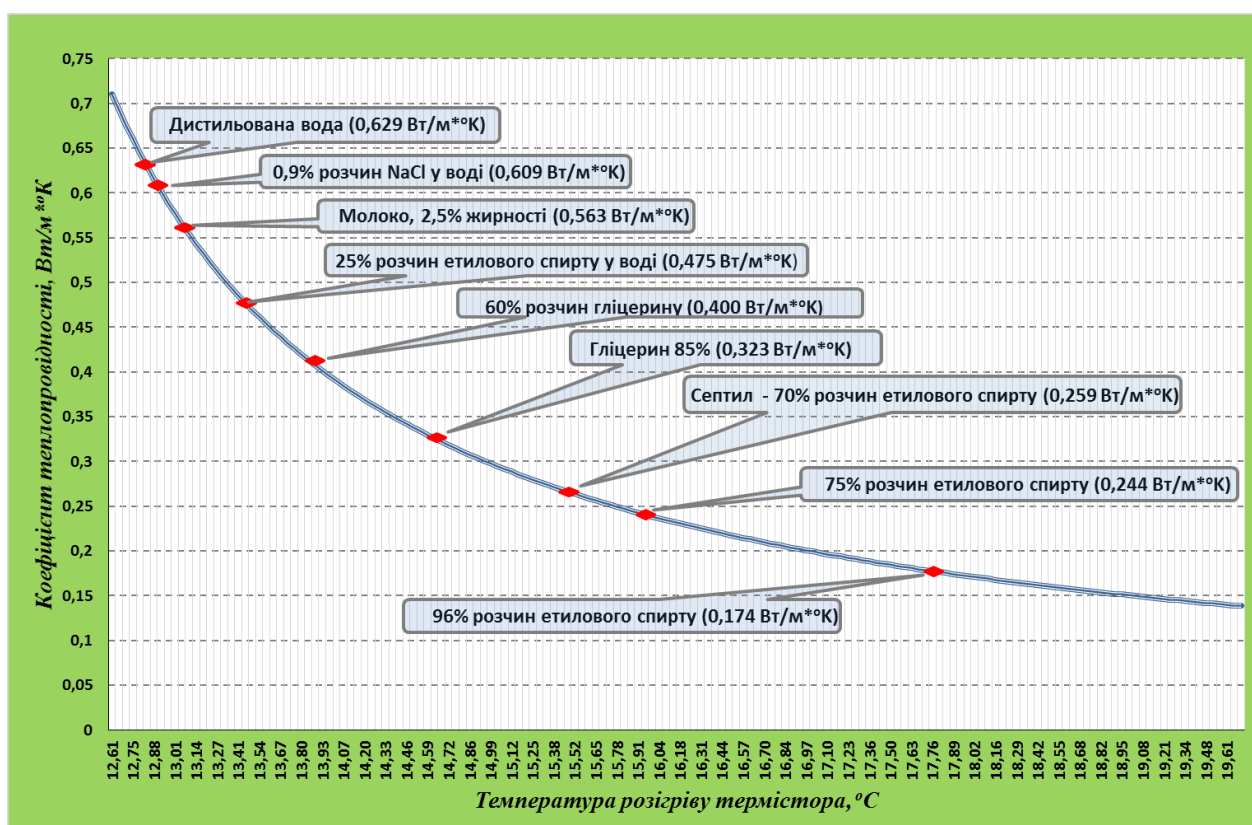


Рис. 3.17. Графік залежності коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин від температури розігріву термістора.

Дослідження проведено з використанням таких досліджуваних речовин: дистильована вода, фізіологічний розчин (розчин 0,9% NaCl в дистильованій воді), молоко 2,5% жирності, 25% розчин етилового спирту в дистильованій воді, 60% розчин гліцерину в очищеній воді, 80% розчин гліцерину в очищеній воді, 85% розчин гліцерину в очищеній воді (розчин нашкірний 85%, медичний), 70% розчин етилового спирту в воді («Септол»), 75% розчин етилового спирту в воді, етиловий спирт медичний 96-Екстра (96% розчин етилового спирту в воді).

При проведенні розрахунків враховувались середні значення ТФХ для кожного із зондів за один 10-ти хвилинний сеанс вимірювання. Дані всіх вимірювань були враховані і розміщені в один файл. Розподіл значень коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин представлено на рис. Б.21 Додатку Б, а числові дані вимірювання – в таблиці 3.1[101, 102].

Таблиця 3.1. Результати вимірювання коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин за один сеанс вимірювання 10 хв.

| Досліджувана речовина | Коефіцієнт теплопровідності | | | | | | |
|--|-----------------------------|---|---|---|--|---------------------|--------------------------------|
| | Отримане значення, Вт/(м*К) | Середньоквадратичне відхилення, σ , Вт/(м*К) | Абсолютне значення випадкової похибки, $\Delta\lambda_{\text{вип.}}$ (P=0,95), Вт/(м*К) | Абсолютне значення систематичної похибки, $\Delta\lambda_{\text{сист.}}$, Вт/(м*К) | Абсолютне значення похибки, $\Delta\lambda$ (P=0,95), Вт/(м*К) | Відносна похибка, % | Довідникове значення, Вт/(м*К) |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Дистильована вода | 0,6288 | 0,00688 | 0,006157 | 0,0008 | 0,0062084 | 0,99 | 0,628 |
| Фізіологічний розчин (розчин 0,9% NaCl в воді) | 0,6097 | 0,01003 | 0,008975 | 0,0023 | 0,0092654 | 1,52 | 0,612 |
| Молоко 2,5% | 0,5632 | 0,00707 | 0,006327 | 0,0008 | 0,0063770 | 1,13 | 0,564 |
| 25% розчин етилового спирту в воді | 0,4753 | 0,00918 | 0,008215 | 0,0017 | 0,0083888 | 1,77 | 0,477 |
| 60% розчин гліцерину в воді | 0,4001 | 0,00501 | 0,004483 | 0,0011 | 0,0046162 | 1,15 | 0,399 |
| 80% розчин гліцерину | 0,3408 | 0,00412 | 0,003687 | 0,0048 | 0,0060525 | 1,78 | 0,336 |
| Гліцерин 85% | 0,3233 | 0,005343 | 0,004781 | 0,0003 | 0,0047907 | 1,48 | 0,323 |
| Септол 70% розчин етилового спирту в воді | 0,2601 | 0,003295 | 0,002949 | 0,0011 | 0,0031479 | 1,21 | 0,259 |
| 75% розчин етилового спирту в воді | 0,2445 | 0,002901 | 0,002596 | 0,0005 | 0,002644 | 1,09 | 0,245 |
| Етиловий спирт медичний (96% розчин етилового спирту в воді) | 0,1741 | 0,003134 | 0,002804 | 0,0009 | 0,002945 | 1,69 | 0,175 |

Довідникові значення коефіцієнтів теплопровідності досліджуваних речовин отримано із [14, 35].

Результати визначення коефіцієнтів теплопровідності різноманітних речовин, що наведено в таблиці 3.1, дозволяють прийти до висновку, що склад (концентрація) речовини значно впливає на її теплопровідність. Так, збільшення

концентрації розчину гліцерину в воді з 60% до 85% знижує її теплопровідність з 0,4001 до 0,3233. Подібне зменшення теплопровідності з 0,4753 до 0,1741 спостерігається при збільшенні кількості спирту в розчині води з 25% до 96%. Наведені приклади вказують на можливість контролю складу речовини за величиною її теплопровідності як при виготовленні, так і при застосуванні.

3.8. Оцінка адекватності математичної моделі визначення коефіцієнта теплопровідності речовини та обчислення похибки його вимірювання

З метою встановлення похибок визначення коефіцієнта теплопровідності та перевірки адекватності отриманої математичної моделі проведено комплекс із ста вимірювань десяти різноманітних досліджуваних речовини.

Обробка результатів вимірювання виконувалась за методикою, що наведена в [139].

Середнє арифметичне значення коефіцієнта теплопровідності $\bar{\lambda}_{\text{д.р.}}$ кожної досліджуваної речовини визначали за формулою

$$\bar{\lambda}_{\text{д.р.}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{д.р.}i}, \quad (3.1)$$

де $\lambda_{\text{д.р.}i}$ – результат i -го вимірювання;

n – кількість повторень вимірювань кожної із M досліджуваних речовин.

Результати обчислень внесені надано в таблиці 3.1 (стовпчик 2).

Середнє квадратичне відхилення результатів вимірювання коефіцієнта теплопровідності від його середнього значення визначали як:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{\lambda}_{\text{д.р.}} - \lambda_{\text{д.р.}i})^2}{n-1}}. \quad (3.2)$$

При значній кількості вимірювань можна вражати, що середнє арифметичне значення $\bar{\lambda}_{\text{д.р.}}$ наближається до математичного очікування результатів вимірювання, а S_n прагне до сталого значення σ :

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n, \quad (3.3)$$

Тоді σ^2 є дисперсією вимірювань. За результатами вимірювань завжди вираховують наближене значення S_n .

Результати обчислень математичного очікування та середнього квадратичного відхилення результатів вимірювання наведено в таблиці 3.1.

Важливим при визначенні теплопровідності речовин є встановлення величини відхилення істинного його значення $\lambda_{\partial.p.i}$ від середнього арифметичного $\bar{\lambda}_{\partial.p.}$, для n вимірювань. Теоретично середня квадратична похибка середнього арифметичного S визначається як:

$$S = \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \quad (3.4)$$

Це відповідає фундаментальному закону зростання точності при зростанні кількості спостережень.

Тоді для рівня значущості α , що відповідає довірчій ймовірності $p=1-\alpha$, результат вимірювань відрізняється від істинного на величину, яка не перевищує $\Delta\lambda_{\partial.p.}$. Таким чином можна визначити інтервал значень вимірюваної величини $[\bar{\lambda}_{\partial.p.} - \Delta\lambda_{\partial.p.}, \bar{\lambda}_{\partial.p.} + \Delta\lambda_{\partial.p.}]$, що є довірчим інтервалом.

Напівширину довірчого інтервалу визначають як:

$$\Delta\lambda_{\partial.p.\text{вип.}} = t_{\alpha,n} S, \quad (3.5)$$

де $t_{\alpha,n}$ – табличне значення коефіцієнта Стюдента, що взятий з рівнем значущості α при кількості степенів свободи n .

Результати обчислень абсолютних значень випадкових похибок вимірювань $\Delta\lambda_{\text{вип.}}$ в Вт/(м*К)) при довірчій ймовірності $p = 0,95$ наведено в таблиці 3.1 (стовпчик 4).

Таким чином можна стверджувати, що при рівні значущості $\alpha = 0.95$ дійсне значення величини $\lambda_{\partial.p.\text{іст.}}$ не перевищує $\Delta\lambda_{\partial.p.} \pm \Delta\lambda_{\partial.p.\text{вип.}}$.

Для встановлення межі розширеного довірчого інтервалу необхідно врахувати систематичну похибки $\Delta\lambda_{\partial.p.cист..}$, яка визначалась як різниця значення величини, отриманої в результаті вимірювання (середнє значення всіх вимірювань в серії) і опорного значення, у даному випадку – табличного значення, взятого з довідників [139]. .

Результати обчислень систематичної похибки $\Delta\lambda_{сист}$ в Вт/(м*К) представлено в таблиці 3.1 (стовпчик 5).

Загальну похибку визначали як:

$$\Delta\lambda_{\partial.p..} = \sqrt{\Delta\lambda_{\partial.p.вип.}^2 + \Delta\lambda_{\partial.p.сист..}^2} . \quad (3.6)$$

Абсолютні значення похибок визначення коефіцієнтів теплопровідності досліджуваних рідин $\Delta\lambda$ (при $p = 0,95$) в Вт / (м*К) надано в таблиці 3.1 (стовпчик 6).

Відносну похибку обчислень визначали як:

$$\delta = \frac{\Delta\lambda_{\partial.p..}}{\lambda_{\partial.p.}} 100\% \quad (3.7)$$

Результати обчислень відносної похибки надано в таблиці 3.1 (стовпчик 7).

Для перевірки адекватності отриманої математичної моделі визначення коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин за формулою (2.38) використано результати комплексу сеансів вимірювання, результати яких наведено в таблиці 3.1.

Перевірка адекватності отриманої математичної моделі здійснювали за F -критерієм Фішера [139].

Розрахункове значення цього критерію визначається за формулою:

$$F_p = \frac{S_{\lambda\alpha\partial}^2}{S_{\lambda}^2} , \quad (3.8)$$

$$S_{\lambda\alpha\partial}^2 = \frac{1}{M} \sum_{U=1}^M (\bar{\lambda}_U - \tilde{\lambda}_U)^2 , \quad (3.9)$$

де $S_{\lambda ad}^2$ – дисперсія адекватності отриманої моделі, що характеризує відхилення середніх значень коефіцієнтів теплопровідності досліджуваних речовин $\bar{\lambda}_U$ за довідковими даними від значень вихідної величини $\tilde{\lambda}_U$, які отримані за допомогою математичної моделі;

– S_{λ}^2 – оцінка дисперсії відтворюваності результатів експериментальних досліджень, що визначали за формулою:

$$S_{\lambda}^2 = \frac{1}{M(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{U=1}^M (\lambda_{Ui} - \bar{\lambda}_U)^2, \quad (3.10)$$

де λ_{Ui} – значення коефіцієнта теплопровідності i -го вимірювання U -тої досліджуваної речовини; $\bar{\lambda}_U$ – середнє значення коефіцієнта теплопровідності U -тої досліджуваної речовини за n вимірювань; M – кількість досліджуваних речовин.

Розрахункове значення критерію Фішера порівнювали з його табличним значенням $F_{табл.\alpha, f_1, f_2}$, що взятє з рівнем значущості α та кількістю ступенів свободи f_1 та f_2 , де $f_1 = M$, а $f_2 = M(n-1)$.

Математична модель за критерієм Фішера вважається адекватною з довірчою ймовірністю $p=1-\alpha$, якщо розрахункове значення критерію не перевищує табличного, тобто $F \leq F_{табл.\alpha, f_1, f_2}$.

З метою оцінки адекватності отриманої математичної моделі визначення коефіцієнтів теплопровідності речовин використано результати досліджень різноманітних речовин (табл. 3.1).

Порівняльні величини отриманих значень коефіцієнтів теплопровідності за довідковими даними $\bar{\lambda}_U$ та в результаті проведення експериментальних досліджень і математичного моделювання $\tilde{\lambda}_U$ наведено в таблиці 3.2.

На основі використання формул (3.3), (3.4), (3.8), (3.9) та (3.10) встановлено, що розрахункове значення критерію Фішера F_p складає 1,12261825. Це значення не перевищує табличного (критичного) значення $F_p \leq F_{табл.\alpha, f_1, f_2}$, що відповідає

рівню значущості $\alpha = 0,05$ ступеням свободи $f_1 = M = 10$ та $f_2 = M(n-1) = 990$, і складає 1,8307.

Таблиця 3.2. Значення коефіцієнтів теплопровідності за довідковими даними $\bar{\lambda}_v$ та в результаті математичного моделювання $\tilde{\lambda}_v$.

| Номер дослідження | Досліджувана речовина | $\bar{\lambda}_v$ | $\tilde{\lambda}_v$ |
|-------------------|---|-------------------|---------------------|
| 1 | Дистильована вода | 0,6288 | 0,6254 |
| 2 | Фізіологічний розчин (розчин 0,9% NaCl в воді) | 0,6097 | 0,6149 |
| 3 | Молоко 2,5% | 0,5632 | 0,5672 |
| 4 | 25% розчин етилового спирту в воді | 0,4753 | 0,4803 |
| 5 | 60% розчин гліцерину в воді | 0,4001 | 0,3944 |
| 6 | 80% розчин гліцерину | 0,3408 | 0,3282 |
| 7 | Гліцерин 85% | 0,3233 | 0,3185 |
| 8 | Септол 70% розчин етилового спирту в воді | 0,2601 | 0,2541 |
| 9 | 75% розчин етилового спирту в воді | 0,2445 | 0,2489 |
| 10 | Етиловий спирт медичний (96% розчин етилового спирт в воді) | 0,1741 | 0,1779 |

Наведені результати оцінки адекватності отриманої моделі визначення теплопровідності речовин вказують її на адекватність з довірчою ймовірністю $p=0,95$.

3.9. Визначення складу речовин за методом прямого підігріву термістора

Для визначення величини розподілу газових сумішей та розчинів часто використовують достатньо простий та найбільш розповсюджений метод аналізу складу суміші, що базується на залежності її коефіцієнта теплопровідності від концентрації компонентів суміші («метод теплопровідності») [9, 91, 114].

Для визначення відносного складу компонентів в сумішах (розчинах) спочатку прилад необхідно калібрувати з використанням сумішей з відомим складом. В наших дослідженнях в якості еталонних сумішей (з відомим складом компонентів) використовувалися: дистильована вода, 25% розчин етилового спирту в дистильованій воді, 60% розчин гліцерину в очищеній воді, 80% розчин

гліцерину в очищеній воді, 85% розчин гліцерину в очищеній воді (розчин нашкірний 85%, медичний), 70% розчин етилового спирту в воді («Септол»), 75% розчин етилового спирту в воді, етиловий спирт медичний 96-Екстра (96% розчин етилового спирту в воді). Калібрування приладу при визначенні відносного складу компонентів в розчинах здійснювалося за довідниковими даними значень теплопровідності цих розчинів [14, 115]. Числові дані, що одержані при вимірюванні значень коефіцієнтів теплопровідності досліджуваних розчинів, представлено в таблиці 3.1.

В якості досліджуваних розчинів при визначенні їх складу використовували розчини гліцерину, етилового спирту та цукру у дистильованій воді. Отримані залежності теплопровідності розчинів від об'ємного вмісту гліцерину, етилового спирту та цукру в їх водяних розчинах представлено на рис. 3.18. Графіки побудовані за даними довідників [14, 115] та даними вимірювань [91]. Вимірювання проводили за методикою, що наведена в п. 3.6.

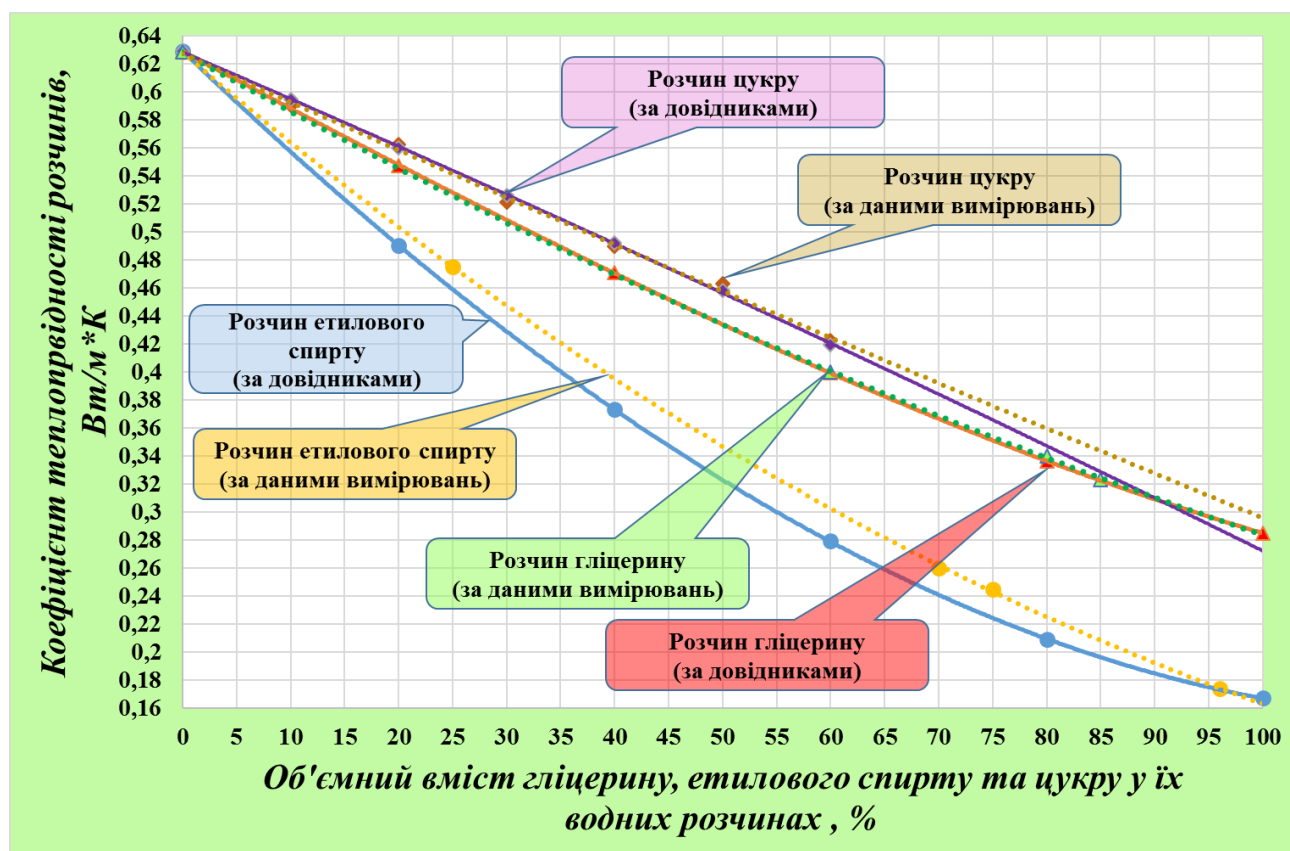


Рис. 3.18. Залежності теплопровідності розчинів від об'ємного вмісту гліцерину, етилового спирту та цукру в їх водяних розчинах.

З представлених залежностей видно, що розрахункові значення теплопровідності розчинів об'ємного вмісту гліцерину та етилового спирту в водяних розчинах співпадають з отриманими значеннями за результатами експериментальних досліджень.

Абсолютна похибка визначення об'ємного вмісту речовини в розчині визначається за формулою:

$$\Delta Y = f'(\lambda) \times \Delta \lambda \quad (3.11)$$

$f'(\lambda)$ – похідна функції залежності об'ємного вмісту Y від теплопровідності розчину λ ;

$Y=f(\lambda)$ – функціональна залежність об'ємного вмісту Y від теплопровідності розчину λ , %;

$\Delta \lambda$ – похибка вимірювання коефіцієнта теплопровідності, Вт/м*К;

ΔY – похибка визначення об'ємного вмісту компонентів розчину, %.

Відносна похибка визначення об'ємного вмісту речовини в розчині визначається за значенням похибки аргументу $\Delta \lambda$ за формулою:

$$\Delta Y_{\%} = (f'(\lambda)/Y) \times \Delta \lambda \quad (3.12)$$

Для функції однієї змінної допустиму абсолютну похибку аргументу, якщо $f'(\lambda) \neq 0$, можна наближено обчислити за формулою:

$$\Delta \lambda = (1/f'(\lambda)) \times \Delta Y \quad (3.13)$$

Графічні залежності об'ємного вмісту етилового спирту в його водяному розчині, гліцерину в водяному розчині та об'ємного вмісту цукру в водяному розчині за величиною теплопровідності розчинів та їх функціональні залежності наведено на рис. 3.19, 3.20 та 3.21 відповідно[91].

Таким чином, за довідниковими даними отримано функціональні залежності відсоткового вмісту речовин у розчині при температурі +40°C, що мають такий вигляд:

1) для розчину етилового спирту у воді –

$$Y_{em. c.} = -905,16\lambda^3 + 1358,9\lambda^2 - 817,58\lambda + 201,71, \quad (3.14)$$

2) для розчину гліцерину у воді –

$$Y_{gl.} = -710,75 \lambda^3 + 1193,8 \lambda^2 - 915,25\lambda + 280,14, \quad (3.15)$$

3) для розчину цукру у воді –

$$Y_{\text{ц}} = 1103,4 \lambda^3 - 1792,5 \lambda^2 + 671,64\lambda + 12,179, \quad (3.16)$$

де $Y_{\text{ет. с.}}$, $Y_{\text{гл.}}$, $Y_{\text{ц.}}$ – відсотковий вміст відповідно етилового спирту, гліцерину та цукру у розчині (%), а λ – коефіцієнт теплопровідності розчину (Вт/м*К).

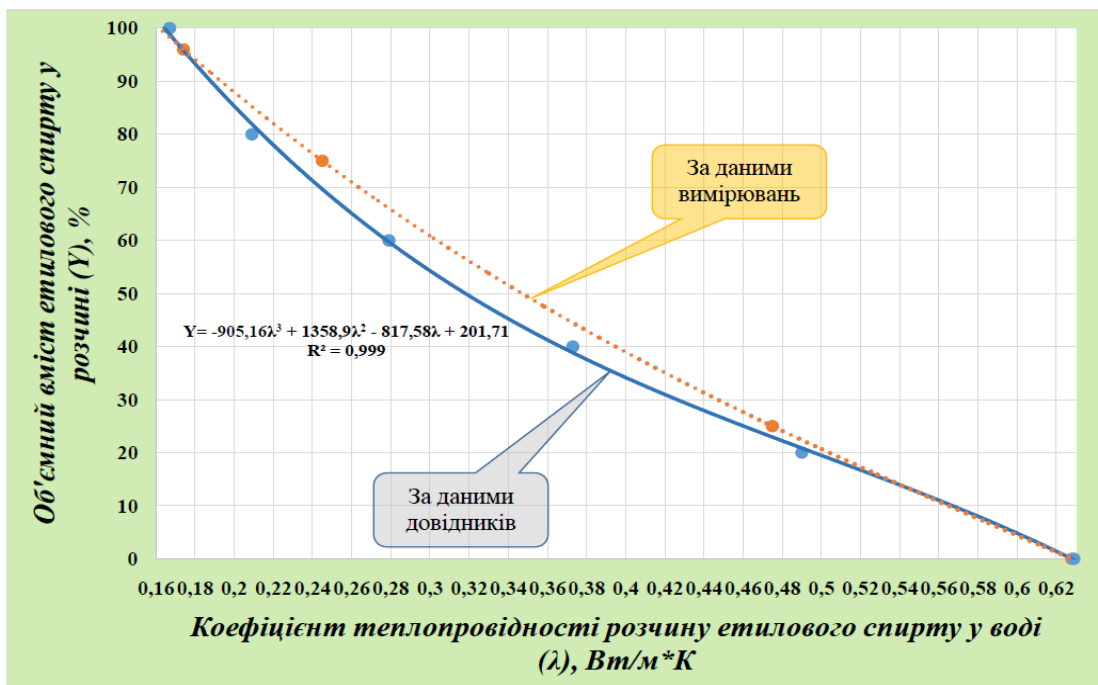


Рис. 3.19. Залежності об'ємного вмісту етилового спирту в водяному розчині від величини теплопровідності розчину.

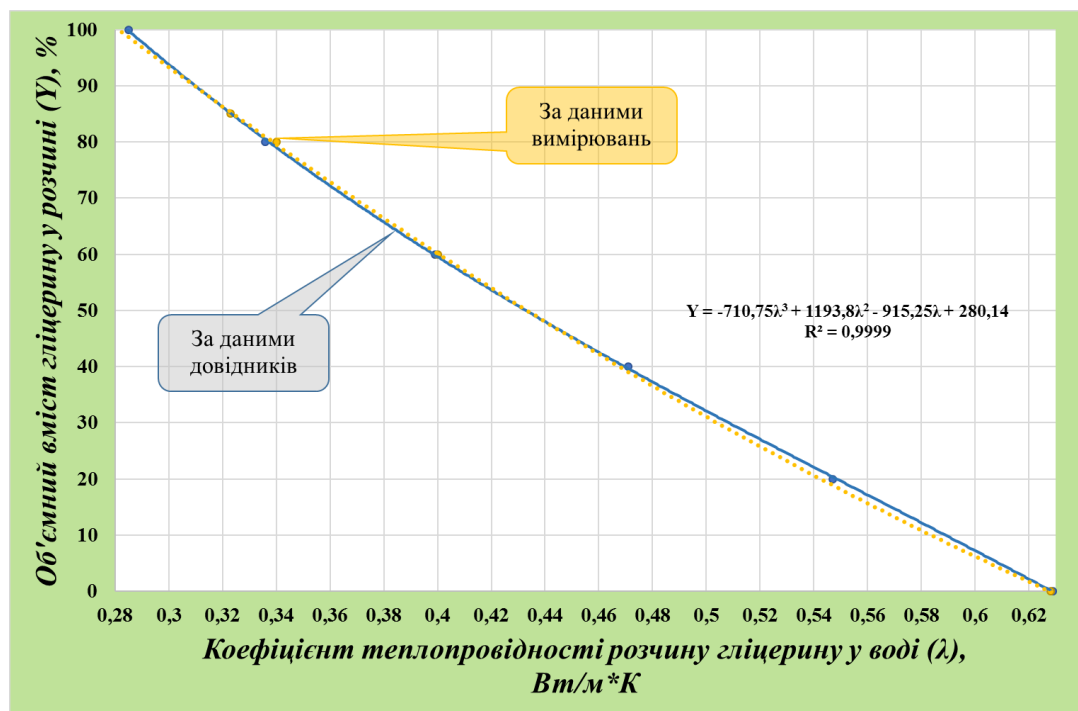


Рис. 3.20. Залежності об'ємного вмісту гліцерину в його водяному розчині від величини теплопровідності розчину.

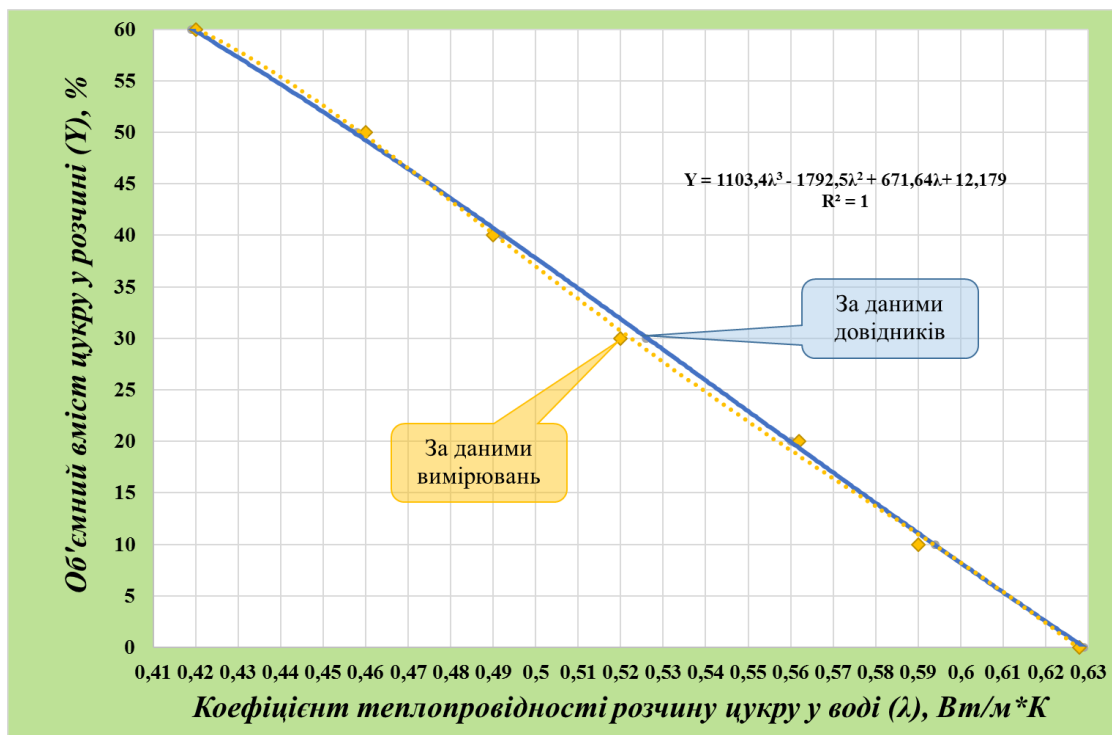


Рис. 3.21. Залежності об'ємного вмісту цукру в його водяному розчині від величини теплопровідності розчину.

Абсолютна похибка визначення об'ємного вмісту речовини в розчині визначається відповідно формулами:

1) для розчину етилового спирту у воді –

$$\Delta Y_{em. c.} = (-2715,48\lambda^2 + 2717,8\lambda - 817,58) \times \Delta\lambda_{em. cn.}, \quad (3.17)$$

2) для розчину гліцерину у воді –

$$\Delta Y_{gl.} = (-2132,25\lambda^2 + 2387,6\lambda - 915,25) \times \Delta\lambda_{gl.}, \quad (3.18)$$

3) для розчину цукру у воді –

$$\Delta Y_{c.} = (3310,2\lambda^2 - 3585\lambda + 671,64) \times \Delta\lambda_{c.} \quad (3.19)$$

де $\Delta Y_{em. c.}$, $\Delta Y_{gl.}$, $\Delta Y_{c.}$ – абсолютні похибки визначення об'ємного вмісту відповідно етилового спирту, гліцерину та цукру у розчині (%);

$\Delta\lambda$ – абсолютні похибки вимірювання теплопровідності розчинів, відповідно етилового спирту, гліцерину та цукру (Вт/м*К).

Абсолютна похибка визначення об'ємного вмісту етилового спирту (рис. 3.22), гліцерину (рис. 3.23) та цукру (рис. 3.24) в їх водяних розчинах,

розрахована за даними вимірювання теплопровідності розробленим приладом в різних режимах, наведена на рис. 3.22- 3.24 [91].

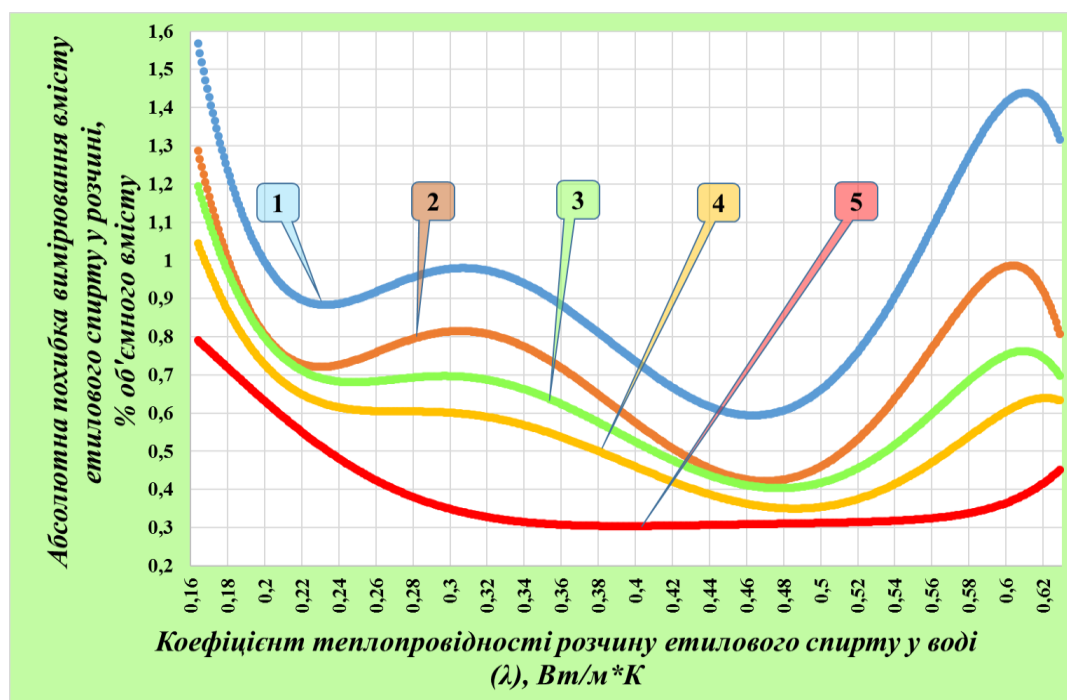


Рис. 3.22. Графіки похибок визначення об'ємного вмісту етилового спирту в його водяному розчині в залежності від теплопровідності розчину, де 1 – 20 термограм; 2 – 40; 3 – 60; 4 – 100; 5 – для 1200 термограм.

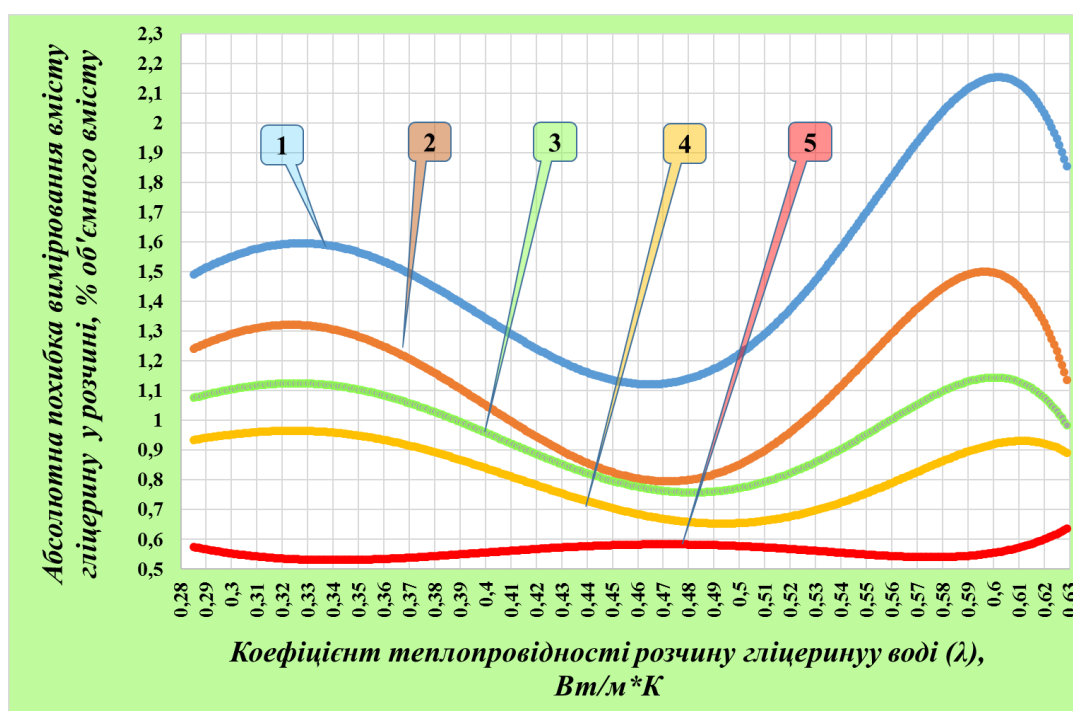


Рис. 3.23. Графіки похибок визначення об'ємного вмісту гліцерину в його водяному розчині в залежності від теплопровідності розчину, де 1 – 20 термограм; 2 – 40; 3 – 60; 4 – 100; 5 – для 1200 термограм.

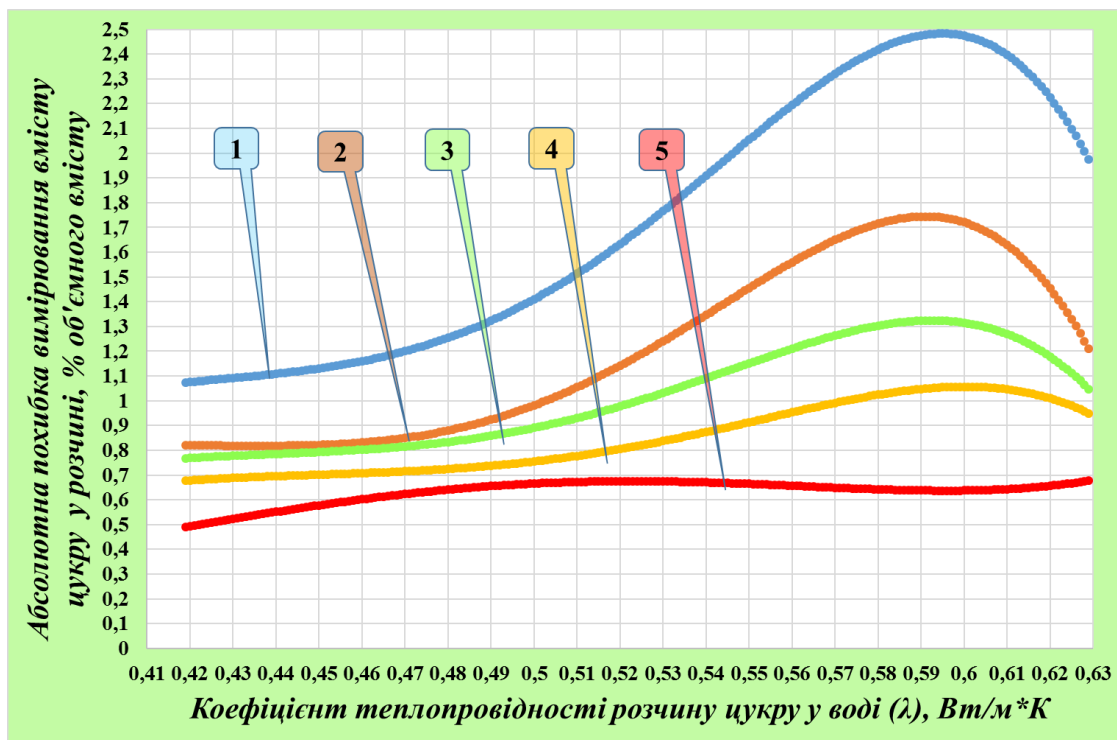


Рис. 3.24. Графіки похибок визначення об'ємного вмісту цукру в його водяному розчині в залежності від теплопровідності розчину, де 1 – 20 термограм; 2 – 40; 3 – 60; 4 – 100; 5 – для 1200 термограм.

Відносні похибки визначення об'ємного вмісту етилового спирту, гліцерину та цукру в їх водяних розчинах в умовних одиницях (1 у.о.=100% об'ємного вмісту речовини), що розрахована за даними вимірювання теплопровідності, наведено на рис. 3.25.

З одержаних в результаті досліджень даних можна зробити висновок, що точність, з якою може бути визначено об'ємний вміст сумішей, залежить від різниці коефіцієнтів теплопровідності компонентів. Так, в даному випадку, похибка визначення об'ємного вмісту гліцерину в його водяному розчині більша, ніж похибка визначення об'ємного вмісту етилового спирту. Для дотримання необхідної точності при вимірюваннях необхідно в залежності від значень різниці коефіцієнтів теплопровідності компонентів вибрати алгоритм і режим досліджень.

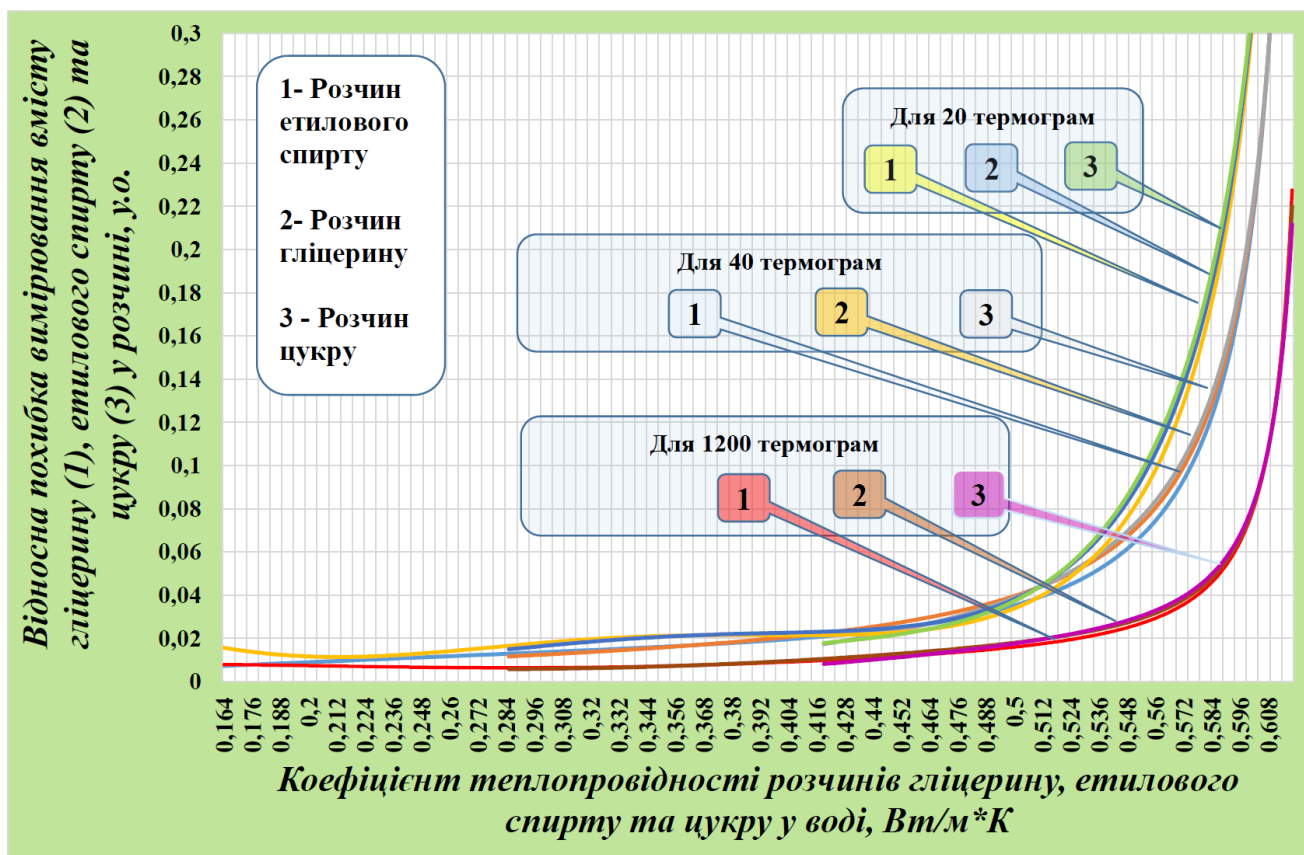


Рис. 3.25. Графіки відносних похибок визначення об'ємного вмісту етилового спирту, гліцерину та цукру в їх водяних розчинах в залежності від теплопровідності розчину, взятих при усередненні 20, 40 та 1200 термограм.

При дослідженні теплопровідності молока з різним ступенем жирності вставлено, що з збільшенням вмісту жирів теплопровідність молока зменшується. Графіки залежності теплопровідності молока від його жирності наведено на рис. 3.26. За даними вимірювань теплопровідності суміші вміст жирів в молоці при різних температурах отримано такі розрахункові формули:

– при температурі + 30 °C:

$$Y_{\text{ж.і.} (+30)} = -121,95 \times \lambda_{\text{і.} (+30)} + 70,39, \quad (3.20)$$

– при температурі + 35 °C:

$$Y_{\text{ж.і.} (+35)} = -125 \times \lambda_{\text{і.} (+35)} + 73,06, \quad (3.21)$$

– при температурі + 40 °C:

$$Y_{\text{ж.і.} (+40)} = -128,1 \times \lambda_{\text{і.} (+40)} + 74,45, \quad (3.22)$$

де $Y_{ж.м. (+30)}$, $Y_{ж.м. (+35)}$, $Y_{ж.м. (+40)}$, – відсотковий вміст жиру в молоці відповідно при температурах +30°C, +35°C та +40°C (%);

$Y_{м. (+30)}$, $Y_{м. (+35)}$, $Y_{м. (+40)}$ – виміряна теплопровідність молока відповідно при температурах +30°C, +35°C та +40°C (Вт/м*К).

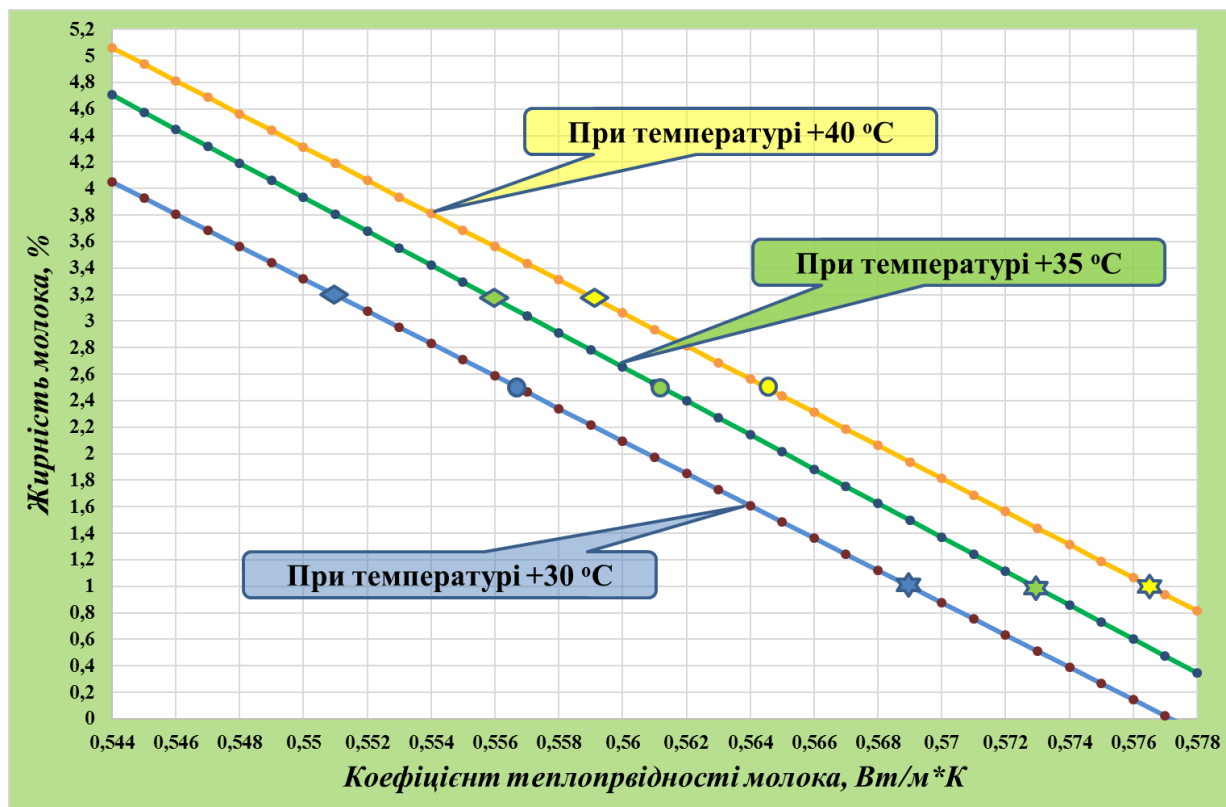


Рис. 3.26. Графічні залежності вмісту жирів в молоці при різних температурах від його теплопровідності.

Аналіз результатів багаторазового вимірювання теплопровідності молока показав, що при одночасному вимірюванні всіма 60 зондами протягом 10 сеансів по 10 хв. кожний (тобто з отриманням 1200 термограм) похибка вимірювання знижується до 1,2 %. Розміщення вимірювального зонда в пробірці з зразком молока показано на рис. 3.28.

Також проведено вимірювання коефіцієнта теплопровідності крові та її розчинів з метою дослідження їх властивостей.

Так, для визначення наявності та ступеня імунологічної реакції запропонованим методом проведено експериментальні дослідження шляхом порівняння ТФХ суміші кров+алерген (рис. 3.27) та контрольної суміші. За

величиною відхилення ТФХ суміші кров+алерген від ТФХ контрольної суміші визначалась наявність та ступінь імунологічної реакції.

Відомо, що біологічні матеріали змінюють свої властивості в часі та при зміні їх температури, тому дослідження їх характеристик необхідно проводити з врахуванням цих обставин за відповідними методиками. Кров, по-перше, має властивість згортватися, а, по-друге, при змішуванні її з речовинами, які запобігають згортванню крові з певним часом розділяється на плазму та важкі фракції (рис. 3.27, рис. 3.31).

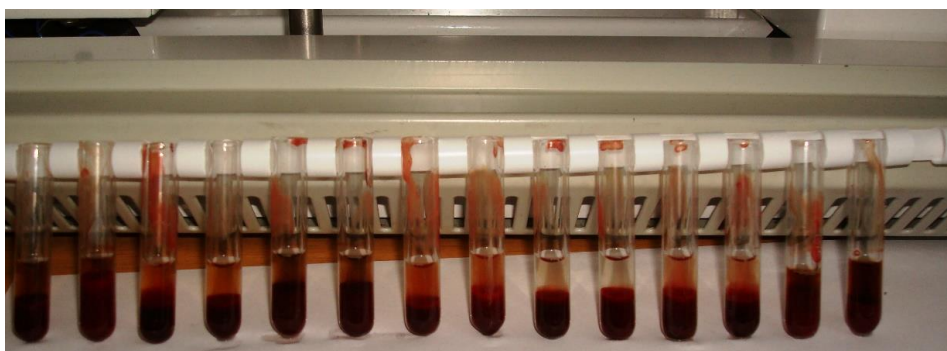


Рис. 3.27. Вигляд розшарування зразків суміші крові з алергеном.



Рис. 3.28. Вид пробірок з заповненням молоком.

При вимірюванні ТФХ крові виявлено, що за рахунок тривалої процедури підготовки досліджуваних зразків суміші крові та їх підігріву до температури $+36^{\circ}\text{C}$, який триває майже 30 хв., відбувається осідання більш важких ферментів (еритроцитів, лейкоцитів та ін.), що приводить до розшарування суміші і, як наслідок, до спотворення результатів вимірювання.

Результати вимірювань показали, що значення величини теплопровідності крові на різній глибині занурення вимірювального зонда відрізняються. Швидкість осідання більш важких фракцій крові (еритроцитів) у позбавленій можливості згортання крові різних пацієнтів не буде однаковою і буде залежати від кількості антикоагулянту, статі пацієнта та його фізіологічного стану. Щільність еритроцитів перевищує щільність плазми, тому вони повільно осідають

на дно посудини, в якій знаходиться кров. Швидкість осідання залежить від ступеню їх агрегації (властивості «злипатися»).

Враховуючи ці обставини, при дослідженнях теплопровідності крові людини необхідно максимально скоротити процедуру підготовки досліджуваної крові. В багатьох випадках, наприклад, при імунологічних дослідженнях, необхідно досліджувати ТФХ кількох десятків сумішей кров+алерген (рис. 3.27) і тому процедура підготовки зразків займає тривалий час. Ці вимірювання проводили шляхом поступового занурення вимірювального зонда в досліджувану суміш. Занурення зонда здійснювали за допомогою електропривода з редуктором, який опускає та піднімає вимірювальний модуль приладу. Керування електроприводом здійснювали за допомогою клавіш на лицевій панелі приладу. Для цього шляхом натискання на визначений час клавіші «ВНИЗ» вимірювальний модуль опускали на відповідну відстань. В процесі досліджень модуль періодично опускали з кроком 1 мм і після цього здійснювали чергову процедуру вимірювання протягом 10 хв.

Дані вимірювання в вигляді графіків наведено на рис. 3.29 та рис. 3.30. На цих графіках показано характер зміни теплопровідності в залежності від глибини занурення зонда та діапазону числових значень похибки вимірювання. Аналіз одержаних даних при співвідношенні кров/антикоагулянт 5:1 показав (рис. 3.29), що в верхній частині, де знаходиться розчин плазми і фізрозчин, теплопровідність в середньому становить 0,587 Вт/м*К і поступово зменшується з наближенням до лінії розмежування легких та важких фракцій крові.

Похибка вимірювання при цьому збільшується на межі розшарування, а потім зменшується. Причиною збільшення похибки є неточність розташування зонда відносно межі розшарування та різний рівень лінії розмежування для різних зразків.

Таким чином вимірювання показали, що дослідження теплопровідності таких сумішей можливо проводити при одночасному контролі розташування зонда відносно межі розшарування [90].

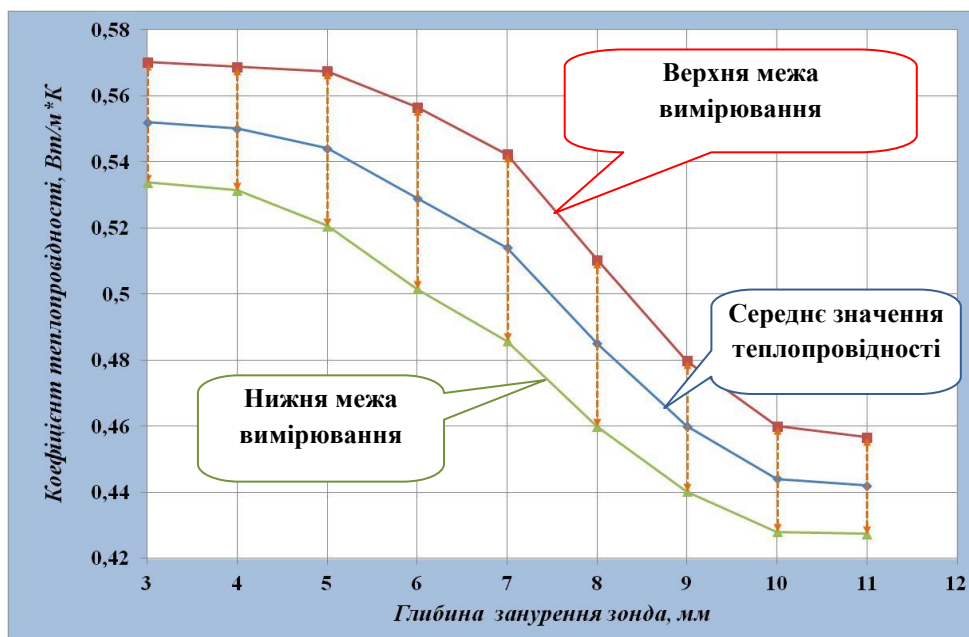


Рис. 3.29. Графічні залежності теплопровідності суміші крові з антикоагулянтом + фізрозчин в пропорції 5:1 від глибини занурення вимірювального зонда.

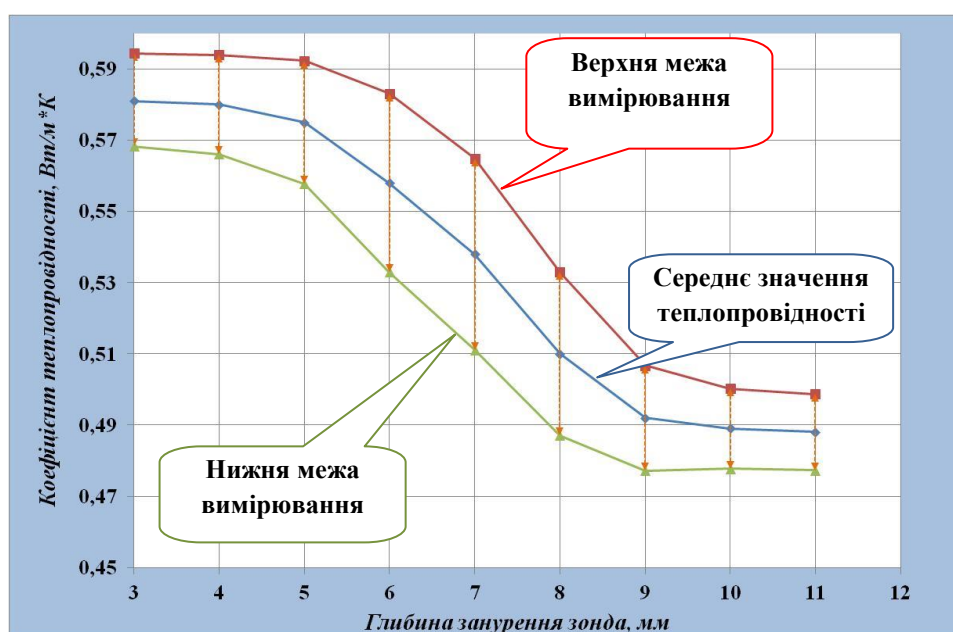


Рис. 3.30. Графічні залежності теплопровідності суміші крові з антикоагулянтом + фізрозчин в пропорції 5:2 від глибини занурення вимірювального зонда.

В процесі досліджень ТФХ крові з'ясувалося, що кількість антикоагулянта (3,8% розчину цитрата натрія) в пропорції 5:1, яка зазвичай використовується, недостатня для повного запобігання процесу згортання крові. В даній пропорції (5:1) часткове згортання крові все-таки відбувається, про що свідчить зменшення

теплопровідності порівняно з даними вимірювання сумішей крові та антикоагулянта в пропорції 5:2 (рис. 3.30).

Вид розшарування суміші кров+фізрозчин наведено на рис. 3.31.

Для визначення можливості вимірювання ТФХ таких сумішей та забезпечення умов досліджень проведено вимірювання ТФХ розшарованих сумішей кров+фізрозчин (рис. 3.31).

Із рис. 3.33 видно, що в суміші при пропорції кров/антикоагулянт 5:1 залишається невеликий згусток крові, який може утворитися на вимірювальному зонді. Оскільки утворений згусток має значно меншу теплопровідність в порівнянні з іншими компонентами крові, він спотворює результати вимірювання, що призводить до значної похибки досліджень. Загальний вигляд вимірювального зонду з утвореним згустком наведено на рис. 3.32, де він зображений червоним колом.

Проведено дослідження плазми крові шляхом визначення її теплопровідності. При цьому вимірювання теплопровідності плазми здійснювали після відокремлення рідкої частини суміші від формених елементів апаратним шляхом. Цю процедуру проводили за допомогою центрифугування цільної крові.

За отриманими результатами досліджень можна зробити висновок, що точність, з якою може бути визначений об'ємний вміст сумішей, залежить від різниці теплопровідності компонентів. Так, в даному випадку похибка визначення об'ємного вмісту гліцерину та цукру в їх водяних розчинах більша (рис. 3.23, рис. 3.24) ніж похибка визначення об'ємного вмісту етилового спирту (рис. 3.22).

При вимірюванні теплопровідності біологічних матеріалів необхідно враховувати їх властивість змінювати з часом свій стан.

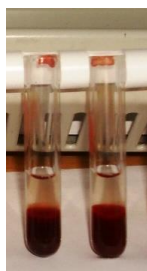


Рис. 3.31. Вид розшарування суміші кров + фізрозчин.

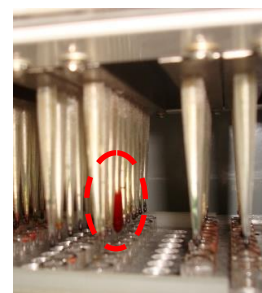


Рис. 3.32. Вид утворення згустка крові.

Так, кров та її розчини з часом розподіляється на більш легкі фракції (плазми) розчину, які залишаються у верхній частині посудини та більш важкі фракції розчину (форменні) – в нижній частині. Метод прямого підігріву термістора дозволяє проводити дослідження таких речовин в малих об'ємах як до моменту розділу речовини на компоненти, так і після. Також метод дозволяє визначити рівень межі розділу та ТФХ досліджуваних матеріалів на різних рівнях. Це дуже важливо не тільки при визначенні ТФХ біологічних матеріалів, та при контролі технологічного процесу створення нанорідин з заданими характеристиками.

Для дотримання необхідної точності при вимірюваннях в залежності від виду компонентів досліджуваних сумішей та нанорідин необхідно добрати алгоритм і режим досліджень.

Висновки до розділу

1. Розроблено дослідний стенд для апробації методу вимірювання теплопровідності речовин, за допомогою якого підтверджено можливість застосування методу прямого підігріву термістора для визначення та контролю складу рідких речовин.

2. Представлено функціональну та електричну схеми, а також виконано аналіз конструкції багатоканального приладу з визначення складу речовин на основі величини їх теплопровідності.

3. За допомогою інтегрованого середовища SiLabs IDE створено програми для мікроконтролерів вимірювального блоку та блоку керування, завдяки яким здійснюється керування етапами досліджень.

4. Розроблено за допомогою пакету *Microsoft Visual C++* програмне забезпечення системи визначення складу речовин на основі величини їх теплопровідності, яке забезпечує загальне керування процесом дослідження.

5. Створена система аналізу даних вимірювань та визначення складу речовин за величиною їх теплопровідності, головне меню інтерфейсного вікна якої складається з семи сторінок. Вибором відповідних сторінок меню та кнопок

керування виконуються вся послідовність дій з визначення коефіцієнтів теплопровідності кожної із досліджуваних речовин.

6. Наведено дані тестових досліджень з використанням еталонних речовин з відомими ТФХ, за результатами яких визначено числові значення корегуючих коефіцієнтів, що необхідні для розрахунку теплопровідності досліджуваних речовин та здійснено необхідні експериментальні дослідження при визначенні складу речовин на основі величини їх теплопровідності методом прямого підігріву термістора. Шляхом проведення комплексу сеансів вимірювання теплопровідності досліджуваних речовин та їх порівняння з відповідними довідниковими даними відомих речовин встановлено, що запропонована математична модель визначення коефіцієнта теплопровідності є адекватною за критерієм Фішера з довірчою ймовірністю 0,95.

7. Встановлено, що точність, з якою може бути визначений об'ємний вміст сумішей, залежить від різниці коефіцієнтів теплопровідності компонентів. При цьому метод прямого підігріву термістора дозволяє проводити дослідження таких речовин в малих об'ємах як до моменту розділу речовини на компоненти, так і після.

8. Наведено результати визначення теплопровідності розчинів від об'ємного вмісту гліцерину та етилового спирту в їх водяних розчинах, залежність теплопровідності молока від вмісту жирів, графіки залежності теплопровідності суміші кров в пропорції 5:1 та 5:2 з антикоагулянт+фізрозчин від глибини занурення вимірювального зонда. Отримані експериментальні дані дозволяють прийти до висновку, що склад (концентрація) речовини значно впливає на її теплопровідність, який можна визначити на основі вдосконаленої математичної моделі визначення ТФХ речовин.

РОЗДІЛ 4.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЛАДУ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ РЕЧОВИН

Виконано дослідження впливу дестабілізуючих факторів та причин їх виникнення, що впливають на похибку вимірювання і визначено засоби зменшення похибки розрахунку теплопровідності досліджуваних речовин до 1,5%.

Представлено результати вимірювання досліджуваних речовин з коефіцієнтами теплопровідності в діапазоні від 0,1 Вт/м*К до 1,0 Вт/м*К. Виконано дослідження впливу дестабілізуючих факторів та причин їх виникнення, що впливають на похибку вимірювання і визначено засоби підвищення точності розрахунку теплопровідності досліджуваних речовин. Визначено похибки вимірювання приладом теплопровідності речовин розробленим приладом.

4.1. Обґрунтування раціональних параметрів досліджень

Для визначення теплопровідності досліджуваних речовин використовуються термограми розігріву термістора, що отримані в процесі проведення досліджень.

4.1.1. Аналіз кривих розігріву термістора різних речовин

В ході проведених досліджень одержані термограми розігріву термістора протягом дії імпульсу тривалістю 6 сек. Ці термограми, що приведені на рис. 4.1, отримані при використанні в якості досліджуваного матеріалу:

- дистильованої води;
- 85% розчину гліцерину в очищеній воді (розчину нашкірного 85%, медичного);
- етилового спирту медичного 96–Екстра (96% розчину етилового спирту в воді);

– повітря кімнатної температури.

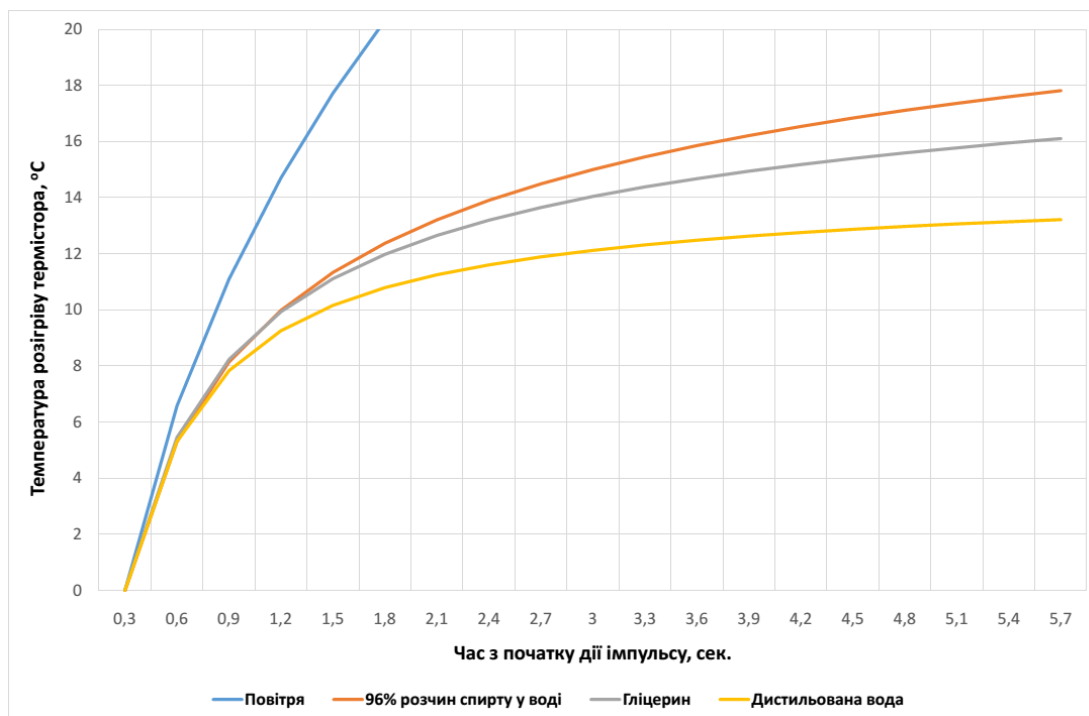


Рис. 4.1. Термограми розігріву термістора для різних досліджуваних середовищ.

З наведених графіків видно, що зі зменшенням значення теплопровідності досліджуваного матеріалу (теплопровідність повітря значно менша від теплопровідності речовин) температура саморозігріву термістора змінюється в діапазоні $12^{\circ}\text{C} \dots 16^{\circ}\text{C}$, що відповідає теоретичним розрахункам за формулою 2.29.

Розбіжність наведених кривих пояснюється наявністю у термістора захисної оболонки, яка утворює додатковий тепловий опір на шляху охолодження термістора.

Факт розбіжності термограм розігріву термістора, з 3-ї по 6-ту секунди від початку дії імпульсу, підтверджують лінійні ділянки, приведені на рис. В.1 Додатку В, одержані при дослідженні таких речовин:

- повітря (термісторний зонд не занурений у речовину);
- дистильованої води;

- 85% розчину гліцерину в очищеній воді (Розчин нашкірний 85%, медичний);
- етилового спирту медичного 96–Екстра (96% розчин етилового спирту в воді).

4.1.2. Вибір режиму нагріву-охолодження термістора

Для визначення оптимального режиму роботи термістора при проведенні досліджень теплопровідності в якості еталонної речовини використано дистильовану воду. З метою встановлення впливу конструкції зондів на вибір режиму роботи експериментального стенду задіяно 10 вимірювальних зондів.

На початку досліджень встановлено такий режим нагріву-охолодження термістора: 8 с. – нагрівання, 16 с. – охолодження. Осцилограма напруги живлення вимірювального мосту приведена на рис. В.2 Додатку В.

В такому режимі за постійної температури досліджуваної речовини проведено сеанси вимірювання термограм розігріву 10 термісторів досліджуваних речовин по 10 хвилин кожний. На рис. 4.2 наведено графік залежності температури розігріву термістора впродовж чотирьох таких сеансів.

З графіків видно, що температура розігріву термістора з початку сеансу за кілька імпульсів розігріву збільшує свою температуру на величину близьку $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, після чого має постійну температуру. Пояснюється це тим, що термістор протягом 16-ти секунд, паузи між імпульсами нагріву по 8 с. не встигає охолоджуватися до температури термостату, в той час за паузу протягом 5 хвилин він охолоджується повністю. Під час дії перших імпульсів нагріву в сеансі вимірювання відбувається порівняно різкий нагрів термістора, що призводить до збільшення похибки.

Якщо в приладі для стабілізації температури протягом сеансу значно збільшити паузу між імпульсами підігріву, це призведе до збільшення сеансу вимірювання та зменшить кількість термограм, за даними яких обчислюється коефіцієнт теплопровідності.

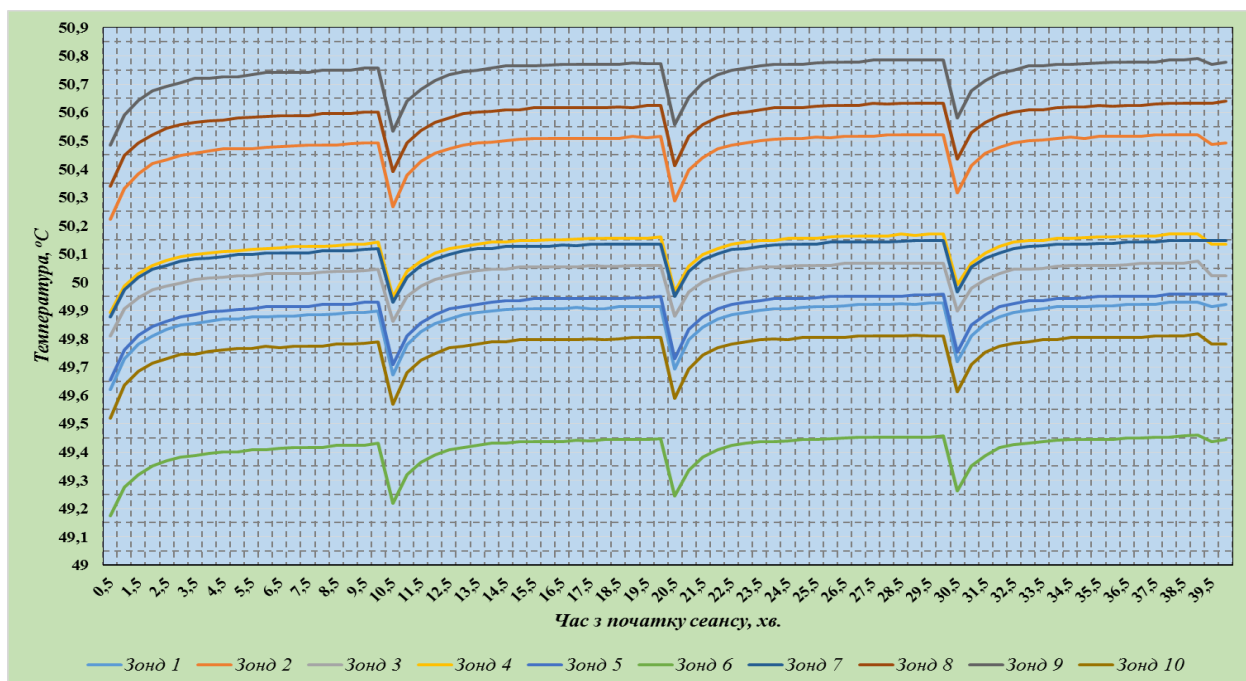


Рис. 4.2. Графіки залежності температури розігріву 10 термісторів протягом чотирьох сеансів вимірювання в режимі 8/16 сек.

Для стабілізації температури, протягом якої проводиться сеанс вимірювання, та усунення явища збільшення своєї температури на величину близьку $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в приладі режим нагріву-охолодження був застосований режим – 6 с. – нагрів, 20 с. – охолодження. При цьому додатково на початку сеансу на термістор подаються два імпульси по 6 сек. кожний з паузою між ними по 20 сек. Таким чином перед вимірюванням термограм температура термістора стабілізується за рахунок дії перших двох імпульсів і подальші вимірювання виконуються при постійній температурі. Тривалість імпульсу розігріву в даному випадку дорівнює постійній часу термістора, протягом якого термістор нагрівається до 62,9% максимальної температури його нагріву.

4.1.3. Визначення об'єму досліджуваної речовини

При виконанні цих досліджень використовувалися дані вимірювання термограм розігріву термістора в дистильованій воді [104].

З метою зниження похибки вимірювання теплопровідності речовин необхідно визначити необхідний для цього об'єм речовин. Також обов'язковою

умовою при проведенні вимірювання є повне занурення термістора в досліджувану речовину. Таким чином мінімальний об'єм використовуваної речовини визначається геометричними розмірами термістора. Термістор RH16 Mitsubishi, який використовується в приладі, має максимальний діаметр 1,8 мм і максимальну довжину – 7 мм (рис. 2.2). З врахуванням цих параметрів чутливого елементу (термістора) необхідно використовувати пробірку з внутрішнім діаметром не менше 6 мм. Конструктивні особливості картриджа визначили доцільність використання пробірок з мінімальним зовнішнім діаметром 8 мм і товщиною стінки не більше 1мм.

На основі наведеного вище, визначено необхідний об'єм досліджуваної речовини для різних пробірок. Результати обчислень для пробірок, що мають діаметри 8, 10 та 12 мм, приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Необхідний мінімальний об'єм досліджуваної речовини для різних пробірок.

| Розміри пробірки (зовн. діам.×висота) | Об'єм речовини у пробірці | Максимальна похибка дозаторів, % | Необхідний об'єм речовини з урахуванням похибки дозування |
|---------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|---|
| 8x45 | 165 мкл | 3 | 170 мкл |
| 10x45 | 362мкл | 4 | 380 мкл |
| 12x45 | 551 мкл | 4 | 575 мкл |

Для дослідження можливості одночасного вимірювання кількома зондами однієї і тієї ж речовини, яка знаходиться в широкій посудині, проведено вимірювання ТФХ дистильованої води в посудинах різних діаметрів (8 мм., 20мм. і 50 мм.). Термограми, що побудовані на основі досліджень, представлені на рис. 4.3 та рис. 4.4. В широкій посудині проходить постійне переміщення холодних та теплих шарів речовини в наслідок явища конвекції, що призводить до спотворення термограми розігріву і як наслідок до значної похибки вимірювання. Крім того, з термограми видно, що в широкій посудині (50 мм.) коливання

температури складає майже 5°C , незважаючи на те, що посудина з досліджуваною речовиною була розміщена в термостаті, температура якого не змінювалася в процесі досліджень. На відміну від термограм, що одержані в результаті вимірювання в широких посудинах в пробірці діаметром 8 мм термограми протягом сеансу вимірювання є однаковими.

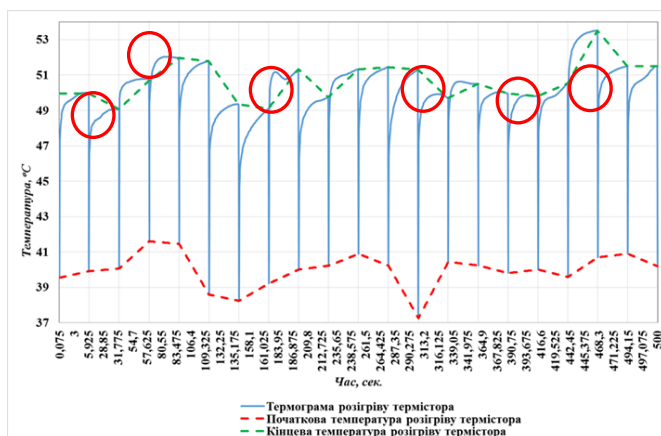


Рис. 4.3. Термограми розігріву термісторів (дистильована вода, посудина діаметром 50 мм) [104].

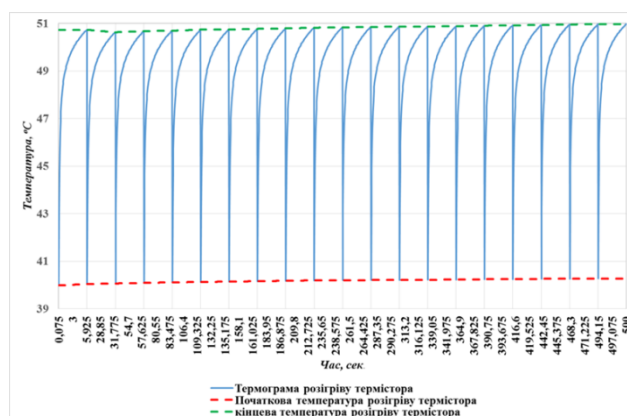


Рис. 4.4. Термограми розігріву термісторів (дистильована вода, пробірка 8*45) [104].

Таким чином встановлено, що в розробленому приладі доцільно використовувати пробірки діаметром 8 мм, що відповідає мінімальному об'єму досліджуваної речовини в 170 мкл [95].

4.2. Визначення корегуючих коефіцієнтів

Для визначення теплопровідності досліджуваних речовин згідно з формулою (2.38) необхідно встановити значення корегуючих коефіцієнтів, що враховують температуру досліджуваних речовин, вплив характеристик термістора на точність визначення температури його розігріву.

4.2.1. Врахування температури досліджуваних речовин

Для визначення впливу температури на результат вимірювань проведено дослідження з використанням двох різних речовин. Для оцінки розподілу

вимірних значень температури досліджуваних речовин під час досліджень з використанням створеного приладу побудовано діаграми їх розподілу в картриджі з дистильованою водою (рис. 4.5) та 96% розчином спирту в воді (рис. 4.6).

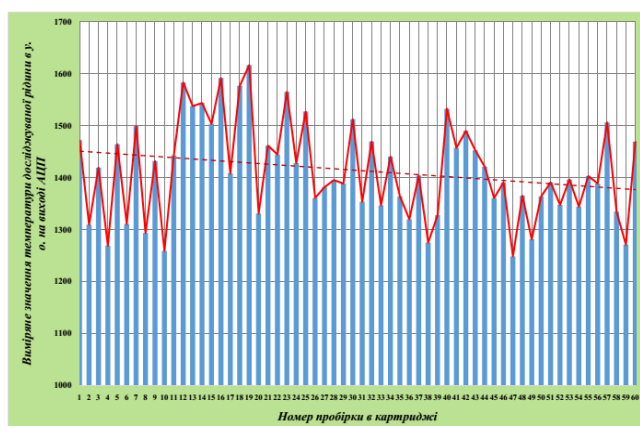


Рис. 4.5. Розподіл температури дистильованої води в картриджі.

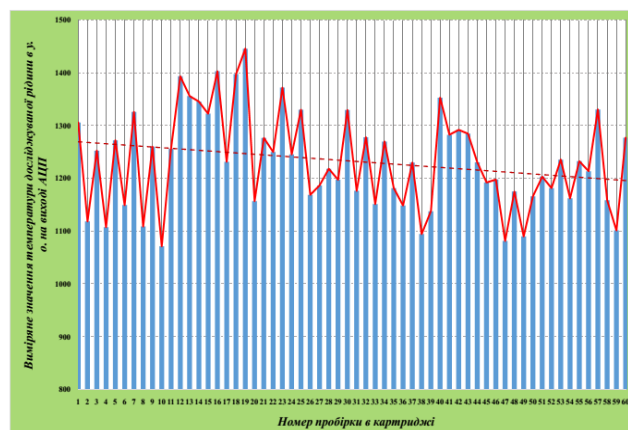


Рис. 4.6. Розподіл температури 96% розчину спирту в воді в картриджі.

З рис. 4.5 та рис. 4.6 видно, що в досліджуваних речовинах при зміні температури дослідження характер розподілу між ЧЕ зберігається, тому можна зробити висновок, що основними складовими похибки вимірювання температури є відхилення параметрів термісторів та постійних резисторів в діагоналі мосту. Для корегування даних вимірювання при визначенні температури досліджуваної речовини необхідно для кожного термістора дослідним шляхом визначити коефіцієнти K_{ni} , які компенсують вказану похибку при проведенні розрахунків. З діаграм розподілу температури видно, що похибка визначення температури складає майже 2,38 °С, що підтверджує результати розрахунків, що наведено на рис. 2.10 (розділ 2).

Для обчислення корегуючих коефіцієнтів K_{ni} використано дані десяти сеансів вимірювання по 10 хвилин кожний еталонних речовин при різних температурах. Досліджувана речовина розливалася у всі шестидесят пробірок картриджу. З кожному сеансу вимірювання для кожного із термісторів взято середнє значення $N_{l_{em.6} i}$ за всі сеанси вимірювання. За відношенням до середнього значення $N_{l_{em.6}}$ за всіма зондами протягом всіх сеансів вимірювання обчислено корегуючі коефіцієнти для кожного із чутливих елементів K_{ni} . Визначено їх

середнє значення, стандартне відхилення та похибка при визначенні цих коефіцієнтів. Значення корегуючих коефіцієнтів K_{ni} для кожного чутливого елементу K_{ni} , що визначені за формулою (2.39), приведені в таблиці В.1 Додатку В.

Похибки при визначенні температури досліджуваних зразків в порівнянні з середнім значенням температури картриджу та її вплив на коефіцієнт теплопровідності розраховано для всього масиву даних випробувань з застосуванням середніх значень корегуючих коефіцієнтів приведені в таблиці В.2 Додатку В.

На рис. В.3 Додатку В приведена гістограма розподілу імовірності відхилення від середнього значення температури досліджуваних зразків по всьому масиву даних проведених досліджень.

4.2.2 Вплив характеристик термістора

Дослідження впливу характеристик вимірювальних зондів та коливання температури зразків на результати вимірювання виконувалось за допомогою розробленого приладу з використанням дистильованої води в якості еталонної речовини.

В результаті проведення дослідження одержана гістограма розподілу значень на виході АЦП $\Delta N_{АЦП}$ (величина нагріву термістора) для всіх 60-ти термісторів приладу (рис. 4.7).

З діаграми (рис. 4.7) видно, що значення даних вимірювання для кожного із чутливих елементів зосереджені нерівномірно. Це пояснюється індивідуальними електричними та тепловими характеристиками чутливого елементу. Враховуючи даний факт, для подальших розрахунків та оцінки похибки вимірювання в формулу (2.40) введено корегуючі коефіцієнти K_{ki} . За даними досліджень такі коефіцієнти були обчислені для кожного із 60 чутливих елементів. Дані обчислень наведено в таблиці В.3 Додатку В.

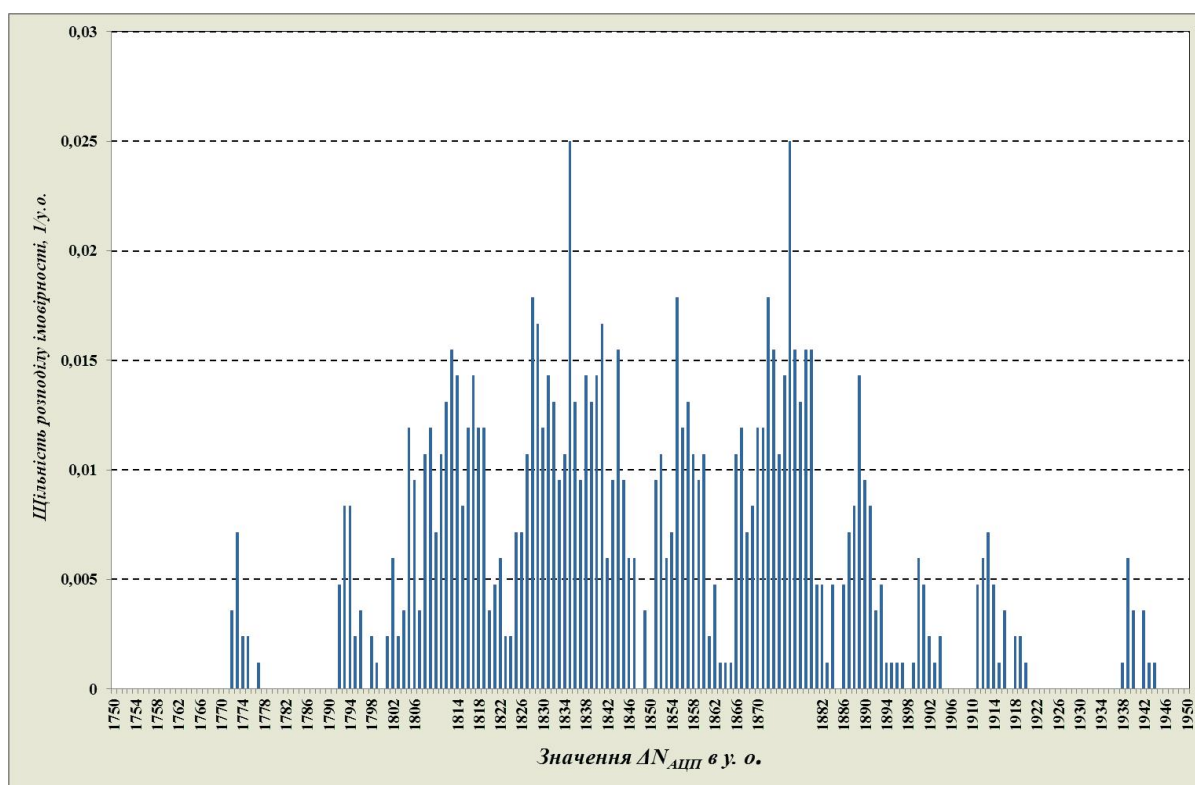


Рис. 4.7. Гістограма розподілу значень на виході АЦП $\Delta N_{АДП}$ (в у. о.).

Як видно із представлених даних, середнє значення відхилення K_{ki} складає близько 1,6%. Розрахунки коефіцієнтів K_{ki} проведені за формулою (3.40). Використання визначених коефіцієнтів дозволило отримати гістограму розподілу значень на виході АЦП $\Delta N_{АДП}$, що наведена на діаграмі (рис. 4.8). Цикл вимірювань складав 10 сеансів. Обчислені коефіцієнти K_{ki} компенсують відхилення значення $\Delta N_{АДП}$ в різних вимірювальних каналах для однієї і тієї ж досліджуваної речовини. При обчисленнях не врахована зміна температури досліджуваних зразків протягом сеансів. Для аналізу впливу зміни температури досліджуваних зразків на результати вимірювання побудовано гістограму розподілу похибки вимірювання шестидесяти зондів протягом циклу вимірювань, що складав 10 сеансів (рис. В.4 Додатку В).

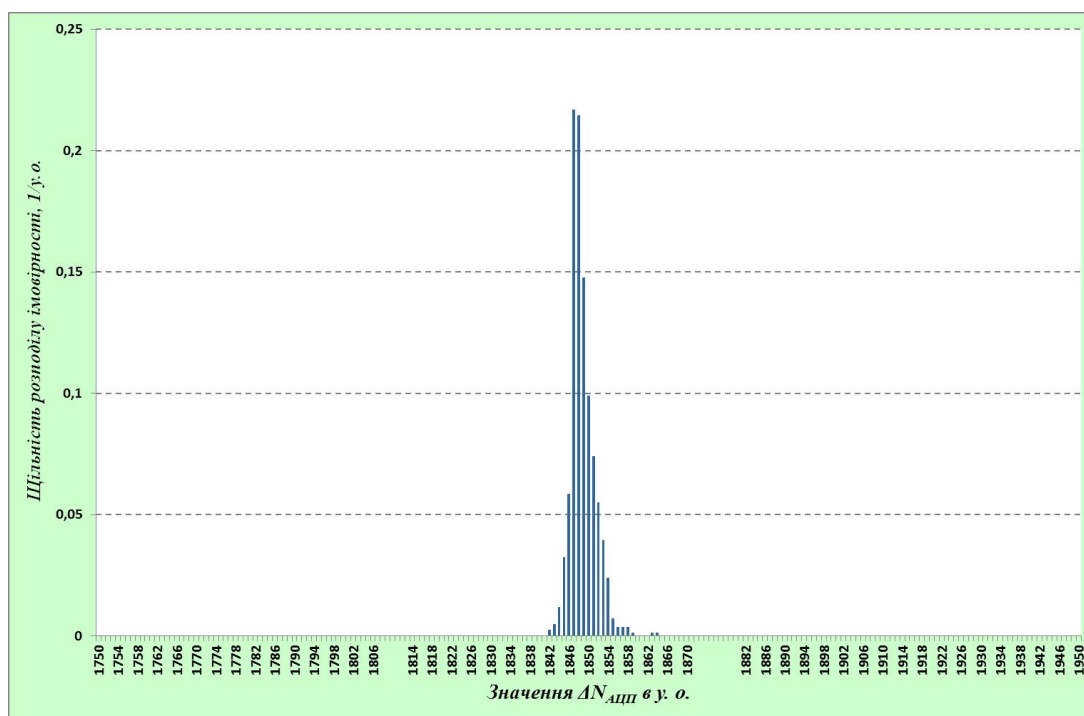


Рис. 4.8. Гістограма розподілу значень на виході АЦП $\Delta N_{AЦП}$ (в у.о., де 1 у.о.= 0,007326 °C/у. о.)

З наведеного графіку видно, що для всіх шестидесяти зондів перші два цикли вимірювань характеризуються різким стрибком значень, а наступні – плавним зменшенням температури розігріву.

На рис. 4.9 показана залежність значення температури розігріву термісторів в 96% розчині спирту протягом чотирьох сеансів по 10 хвилин. В даному випадку нижня крива графіка $N_I = f(T_{\partial.p.})$ свідчить про дрейф температури розчину спирту протягом досліджень. Сукупність кривих в верхній частині графіка $\Delta N_i = f(\Delta T_i)$ – значення на виході АЦП, що пропорційне температурі розігріву термісторів протягом досліджень. Також на рис. 4.10 показаний розподіл температури розігріву термістора в 70% розчині етилового спирту, одержаних в ході досліджень, які проводилися трьома сеансами вимірювання по 10 хвилин кожний при трьох різних температурах досліджуваних речовин.

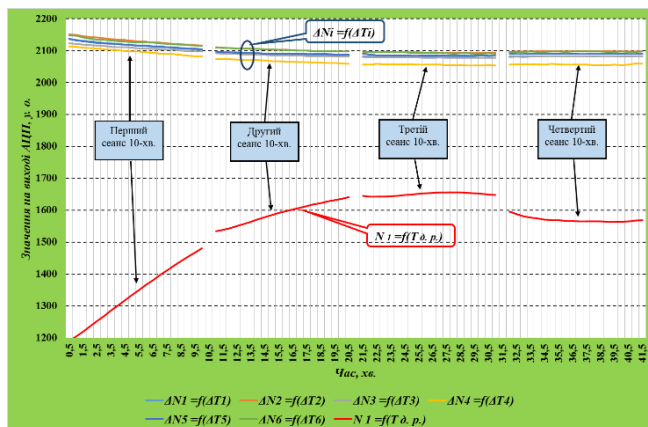


Рис. 4.9. Залежність значень розігріву термісторів на виході АЦП.

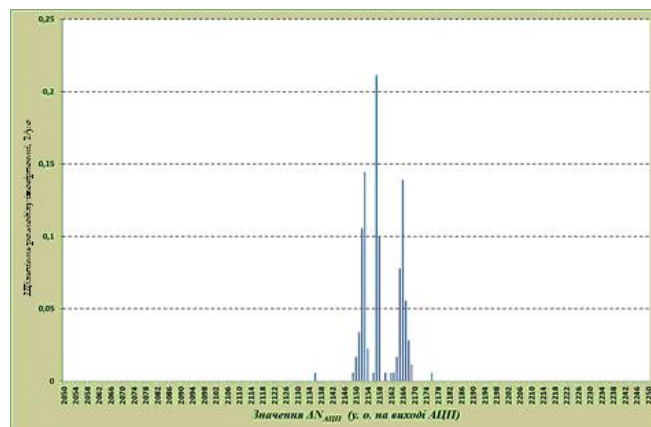


Рис. 4.10. Розподіл значення температури розігріву термістора.

З наведених графіків можна зробити висновок, що зі збільшенням значень на виході АЦП, яке пропорційне температурі досліджуваного зразка, виміряне значення температури розігріву термістора падає. Так, в 70% розчині етилового спирту, який має теплопровідність меншу ніж у дистильованій воді, температура розігріву термістора буде більшою.

Більш точні дослідження для виявлення характеру впливу температури досліджуваного зразка на виміряне значення температури розігріву термістора та визначення корегуючих коефіцієнтів проведені з використанням в якості досліджуваної речовини дистильовану воду. Ці дослідження проводилися при повільному нагріванні досліджуваних зразків. На рис. 4.11 представлені залежності значення температури розігріву термісторів протягом 12 сеансів вимірювання. В даному випадку середня температура розігріву термісторів за сеанс вимірювання знижується, причому кут нахилу (штрихові лінії) для різних термісторів відрізняється. Це пояснюється різними характеристиками чутливих елементів (термісторів). В той же час в межах одного сеансу дослідження температура розігріву термісторів може як збільшуватися з початку сеансу, так і зменшуватися. Це пояснюється розігрівом термістора впродовж дії імпульсу, а в деяких випадках недостатнім охолодженням між імпульсами. Цей процес залежить від теплової інерційності зонду, що викликана розмірами термістора та особливостями його конструкції. Корекція результатів обчислень проводиться

шляхом введення в формулу (2.38) корегуючого коефіцієнта $K_{\Pi i}$.

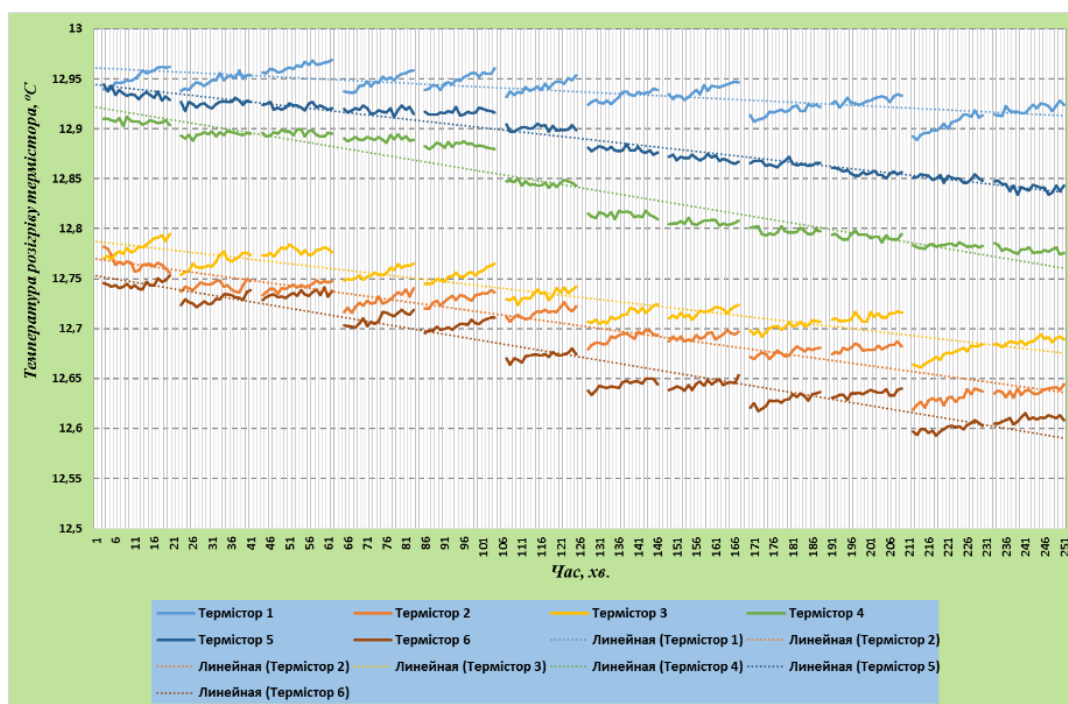


Рис. 4.11. Графіки залежності значення температури розігріву шести термісторів протягом 12 сеансів вимірювання.

Вплив відхилення температури досліджуваного зразка від її номінального значення $+40^{\circ}\text{C}$ (значення, при якому збалансовано вимірювальний міст), що виміряне в ході досліджень величини температури розігріву термістора, корегується за допомогою коефіцієнта $K_{\Pi i}$. Характеристики різних термісторів відрізняються, тому необхідно для кожного з них визначати коефіцієнти $K_{\Pi i}$. Значення $K_{\Pi i}$ розраховується за формулою (2.41), причому для його розрахунку з даних вимірювання вибираються значення вимірювання тих сеансів, протягом яких температура досліджуваних зразків була найменшою та найбільшою. Результати розрахунків значень коефіцієнтів $K_{\Pi i}$ представлені в таблиці В.3 Додатку В.

4.3. Похибки, що виникають в процесі вимірювання теплопровідності

При проведенні метрологічних досліджень з метою визначення похибок процесу вимірювання теплопровідності різних речовин застосовано багатоканальний прилад, схемо-технічні характеристики якого встановлено шляхом тестування дослідного зразка розробленого приладу. Визначені таким чином характеристики розробленого приладу наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Технічні характеристики приладу.

| Характеристика | Числове значення |
|---|--------------------|
| Максимальна кількість зразків, досліджуваних одночасно, шт. | 60 |
| Мінімальний об'єм досліджуваної речовини, мкл | 170 |
| Максимальний об'єм досліджуваної речовини, мкл | 850 |
| Діапазон визначення теплопровідності, Вт/м*К | 0,1–1,0 |
| Час підігріву дослідних зразків, хв. | Не більше 30 |
| Мінімальний час сеансу дослідження, хв. | 2 |
| Максимальний час сеансу дослідження, хв. | 60 |
| Час підготовки зразків до дослідження, хв. | Не більше 45 |
| Діапазон температури досліджуваних зразків, в °С | Від +30,5 до +60,5 |
| Роздільна здатність при визначенні коефіцієнта теплопровідності: – від 0,1 до 0,3 Вт/м*К – більше 0,3 до 1,0 Вт/м*К | 0,01 0,03 |
| Максимальна похибка вимірювання, % | 2 |
| Максимальний час безперервної роботи, год. | 16 |
| Живлення приладу від мережі змінного струму 50 Гц, В | 220±20 |
| Споживана потужність в режимі розігрівання зразків, Вт | не більше 40 |
| Споживана потужність в режимі дослідження, Вт | не більше 20 |
| Робоча температура навколишнього середовища, °С | Від +10 до +30 |
| Інтерфейс для підключення ПК | RS–232C |
| Маса, кг | Не більше 10 |
| Габаритні розміри, мм | 520*600*500 |

Загальна кількість зразків, що досліджувались одночасно, визначається кількістю вимірювальних зондів. В розробленому приладі використано 60 каналів вимірювання. Мінімальний та максимальний об'єм досліджуваної речовини,

необхідної для вимірювань визначено в ході досліджень і приведено в розділі 4.1.3. Він залежить від геометричних розмірів пробірки з досліджуваною речовиною та розмірів вимірювального зонду.

Для розрахунку коефіцієнта теплопровідності досліджуваної речовини важливо, щоб впродовж сеансу вимірювання температура досліджуваної речовини залишалася незмінною. Коливання температури досліджуваної речовини будуть вносити в виміряні значення температури розігріву термістора значну похибку, оскільки початкова та кінцева температури розігріву термістора вимірюються в різні моменти часу. Час розігріву досліджуваних зразків з досліджуваними речовинами має важливе значення при підготовці зразків до тестування. Діапазон різниці температур розігріву термостата з досліджуваною речовиною, в якості якої використовувалась дистильована вода, що отриманий в процесі досліджень, наведено на рис. 4.12. З початку ввімкнення приладу проходить інтенсивний розігрів термостата, а потім потужність розігріву поступово зменшується. Експериментально встановлено, що час розігріву до досягнення початкової температури проведення досліджень при різних умовах лабораторного використання не перевищує 30 хв. Для скорочення часу розігріву картриджу з досліджуваними зразками можливий його підігрів в окремому термостаті.

Час проведення тестування задається оператором – від 2 до 60 хвилин. Дослідження з використанням розробленого приладу показали, що оптимальним є час його проведення складає 10 хвилин. При цьому похибка вимірювання коефіцієнта теплопровідності досліджуваного матеріалу не перевищувала 2,5%.

Діапазон вимірювання температури досліджуваних речовин та похибка при вимірюванні температури встановлені в ході проведення досліджень з визначення корегуючих коефіцієнтів.

Вибір технічних характеристик термісторів та вимірювального каналу здійснювався відповідно до математичної моделі таким чином, щоб діапазон вимірювання коефіцієнта теплопровідності приладом складав від 0,1 до 1,0

Вт/м*К. Діапазон вимірювання температури термістором при цьому складає від 30,5 °С до 60,5 °С.

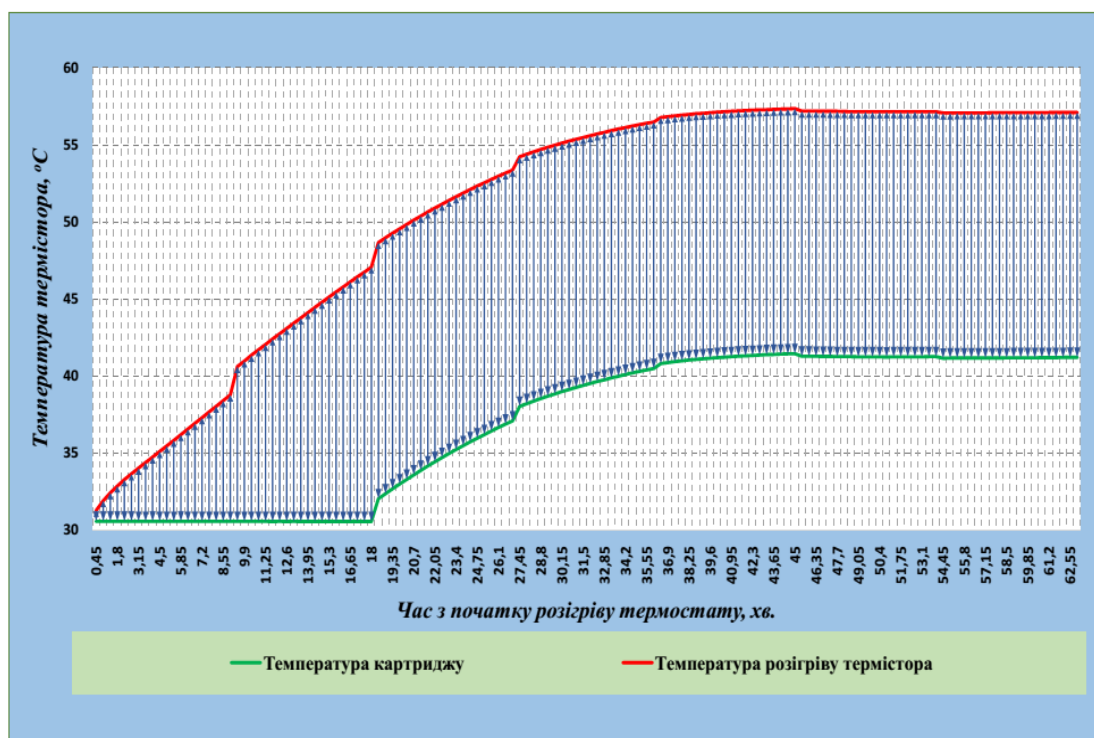


Рис. 4.12. Діапазон різниць температур розігріву термостата з досліджуваною речовиною.

Для визначення роздільної здатності пристрою використано дані вимірювання ТФХ дистильованої води та фізіологічного розчину (розчину 0,9% NaCl в дистильованій воді) [99]. Результати приведені в таблиці 4.3 та на рис. В.5 Додатку В.

Таблиця 4.3. Результати вимірювання коефіцієнта теплопровідності дистильованої води та фізіологічного розчину (розчин 0,9% NaCl в воді).

| Дослідна речовина | Коефіцієнт теплопровідності | | |
|--|-----------------------------|---|------------------------|
| | Середнє значення, Вт/(м* К) | Середньоквадратичне відхилення, Вт/(м* К) | Похибка вимірювання, % |
| Дистильована вода | 0,6288 | 0,00688 | 1,093 |
| Фізіологічний розчин (розчин 0,9% NaCl в воді) | 0,6097 | 0,01003 | 1,645 |

За даними вимірювань можна зробити висновок, що роздільна здатність приладу складає не менше ніж 3σ , тобто не перевищує $0,03 \text{ Вт/(м}^* \text{ К)}$ при значенні теплопровідності в діапазоні $0,6\text{--}1,0 \text{ Вт/(м}^* \text{ К)}$.

4.3.1. Причини виникнення похибок та вплив дестабілізуючих факторів

Для забезпечення заданого метрологічного рівня визначення теплопровідності речовин важливо при проведенні досліджень за допомогою приладу в умовах його експлуатації провести аналіз джерел виникнення похибки та вплив дестабілізуючих факторів на загальну похибку вимірювання. Для цього в ході досліджень проведено аналіз можливих причин виникнення похибок, які представлені на рис. 4.13. Загальна похибка вимірювань містить у собі складові, які виникають внаслідок похибки внесеної дією людини, яка здійснює дослідження (похибки оператора), похибки вимірювання приладу (інструментальна похибка), недосконалості застосованої математичної моделі (похибки методу) та похибки обробки результатів вимірювань.

Узагальнений аналіз впливу дестабілізуючих факторів на похибку вимірювання ТФХ інтелектуально-інформаційної системи, якою є розроблений прилад розглянутий в роботах Селіванової З.М. [116, 117]. Враховуючи конструктивні та фізичні особливості методу та приладу, на рис. 4.14 наведена класифікація дестабілізуючих факторів.

Основними дестабілізуючими факторами впливу на вимірювальний зонд приладу є зміна температури, тиску і вологості навколишнього середовища [116], зміна контактного термоопору в області вимірювання (в області контакту термістора і досліджуваної речовини) [118] та тепловіддачі в цій області [119].

Дестабілізуючі фактори, що впливають на вимірювальний канал приладу, є перешкоди, що класифікуються за формою, джерелами походження та за механізмом проникнення в електричну схему і багатьох інших ознаках [116, 117]. Ці фактори розглянуті в розділі 4.3.5.

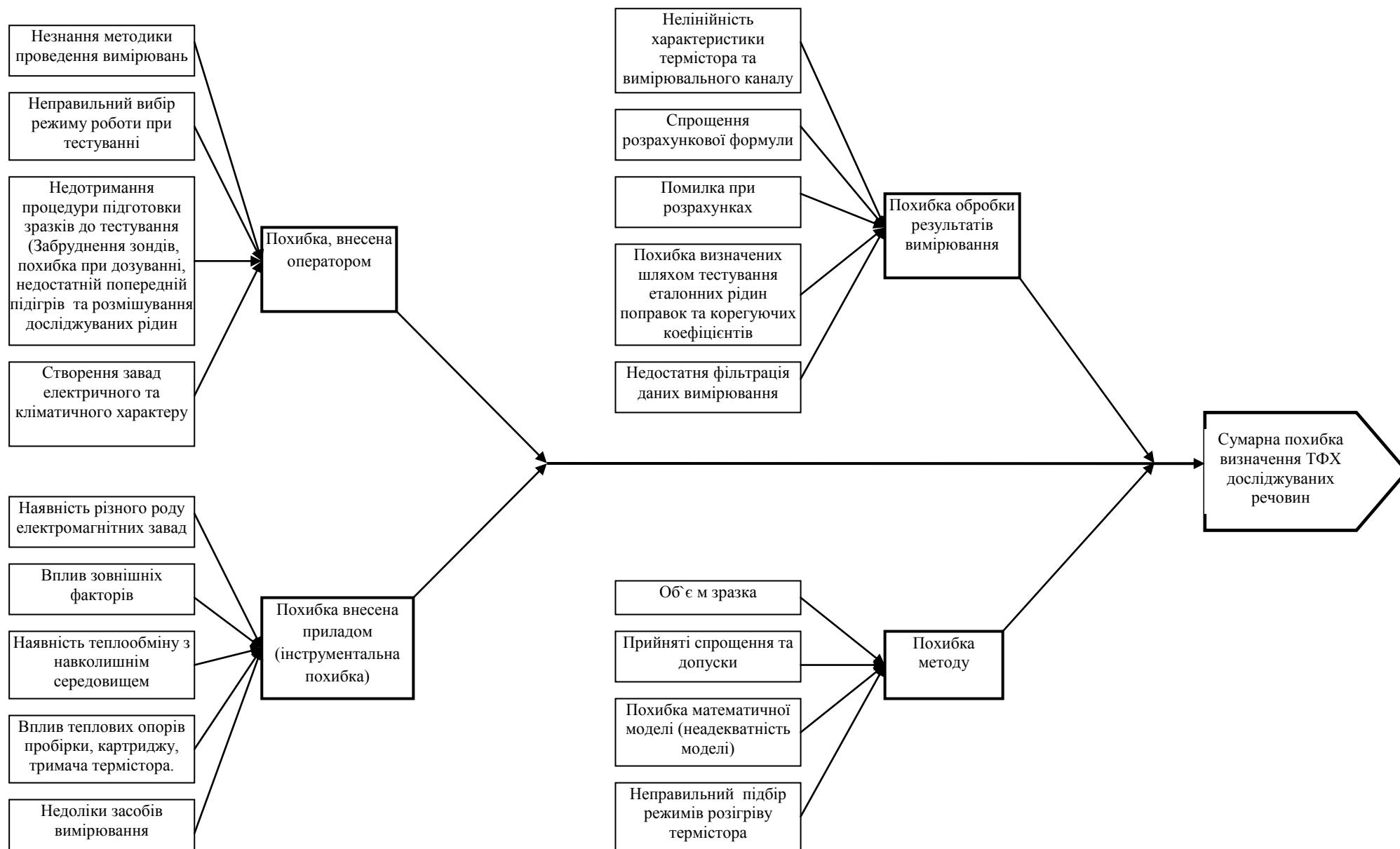


Рис. 4.13. Причинно-наслідкова діаграма виникнення похибки при проведенні досліджень.

4.3.2. Похибки, що пов'язані з реалізацією методу прямого підігріву термістора

При розробці математичної моделі температурного поля (розділ 3) у вимірювальному приладі були застосовані наступні спрощення і припущення:

- температурне поле в досліджуваному зразку одновимірне і залежить тільки від часу;
- у шарі досліджуваного матеріалу відсутні внутрішні джерела тепла;
- зміна теплофізичних властивостей досліджуваного матеріалу в процесі проведення вимірів не враховується;
- незначний тепловий контактний опір між шарами досліджуваного матеріалу, а також між досліджуваним матеріалом і термістором.

З метою обґрунтування прийнятих допущень та зниження методичних похибок при створенні вимірювального приладу реалізовано такі попереджуючі дії:

- для забезпечення одновимірності температурного поля в досліджуваному матеріалі пробірка з речовиною розміщується в алюмінієвому контейнері термостата, що захищений з усіх сторін теплоізоляцією для зменшення теплового впливу навколишнього середовища (розділ 4);
- дослідження матеріалу на наявність джерел теплової енергії при його нагріванні або охолодженні, які виникають при протіканні в ньому хімічних реакцій, або при наявності структурних або фазових перетворень;
- для зменшення теплових контактних опорів здійснюється перевірка конструкції зонда. Зонд не повинен мати забруднень та пошкоджень, а також поверхня зонду змащується досліджуваною речовиною без утворення різного роду плям та прошарків (розділ 4.5, рис. 4.20, рис. 4.22).

4.3.3. Похибки, що обумовлені процесом обробки результатів вимірювання

При проведенні непрямих вимірювань, що виконуються із застосуванням спрощених алгоритмів виникають похибки, що пов'язані не стільки з процесом

вимірювання, а передусім – з похибками обчислень. В даному випадку похибка обчислень виникає із-за введення в розрахункову формулу поправок та корегуючих коефіцієнтів [116-122], визначених шляхом калібрування з застосуванням еталонних речовин. Їх похибка визначена в розділі 4.2 (таблиці В.1-В3 Додатку В).

4.3.4. Похибки, що пов’язані з помилковими діями оператора

У ході проведення вимірювання методом прямого підігріву термістора проведені дослідження похибки (розділ 4.5, рис. 4.20, рис. 4.22), які викликані помилковими діями оператора [118], а саме:

- недостатньо ретельною підготовкою досліджуваного зразка до проведення вимірювань і його розміщенням у вимірювальному картриджі;
- використанням приладу в умовах наявності джерел електромагнітних перешкод, вібрації, коливань температури та інших дестабілізуючих факторів;
- введенням невірних вхідних даних в вікні програми керування приладом;
- некоректною обробкою даних вимірювання.

Для зниження ймовірності виникнення даних похибок реалізовано покрокову методику проведення експерименту, створено інструкцію користувача приладу та навчання операторів методиці проведення експериментальних досліджень за допомогою приладу. Для візуального контролю наявності таких похибок в програму обробки результатів вимірювань введено на вкладці «Корегування» (рис. Б.13 Додатку Б) графіки залежності температури розігріву термістора протягом сеансу вимірювання.

4.3.5. Похибки, що обумовлені конструктивними особливостями вимірювального устаткування

Похибку вимірювання, що зумовлена недосконалістю вимірювального устаткування (інструментальна похибка), зручно представити в вигляді схеми, що складається зі з’єднаних між собою структурних елементів [123, 124]. Для розробленого приладу така схема наведена на рис. 4.15.

Фактори, що впливають на точність вимірювань, розглянуті в роботах [124–128]. За формою походження перешкоди поділяються на імпульсні, флуктуаційні і регулярні [123, 127]. В роботі проведено аналіз дестабілізуючих факторів, що впливають на точність та достовірність вимірювань за допомогою розробленого приладу та визначено комплекс заходів для запобігання їх впливу (рис. 4.16):

- в первинну мережу живлення вводиться мережевий фільтр та джерело безперебійного живлення для зменшення коливань напруги в мережі та його фільтрації (розділ 3.4.5);

- для зменшення похибки, яку вносить АЦП та впливу різного роду перешкод в програму обробки даних кожного мікроконтролера вимірювальних блоків введено алгоритм з накопиченням даних вимірювання та подальшої статистичної обробки (розділ 4.4);

- для зменшення механічних впливів (удари, вібрації) кліматичних умов (температура, вологість, тиск навколишнього середовища) застосовано спеціальні конструктивні заходи (розділ 3.4);

- для забезпечення постійного теплового режиму у зоні вимірювання приладу досліджувані зразки розміщені в термостаті (розділи 3.4.3 та 3.4.4);

- для стабільної роботи вимірювального каналу та зменшення впливу кліматичних факторів навколишнього середовища вузли приладу розміщені в шафі зі скляними дверцятами (розділ 3.4), а в приладі застосовано спеціальні заходи: використано електрорадіоелементи, що розраховані на роботу в широкому температурному діапазоні.

На рис. 4.15 наведена структурна схема приладу, на якій наведено дестабілізуючі фактори, що впливають на результати вимірювання теплопровідності речовин.

Аналіз впливу дестабілізуючих факторів на досліджувану речовину, термісторний зонд, вимірювальний блок та блок керування приладу, що включає АЦП і мікроконтролери, дозволив при створенні приладу для визначення теплопровідності речовин застосувати всі необхідні конструктивні та апаратні заходи для збільшення точності вимірювання, які представлено на рис. 4.16.

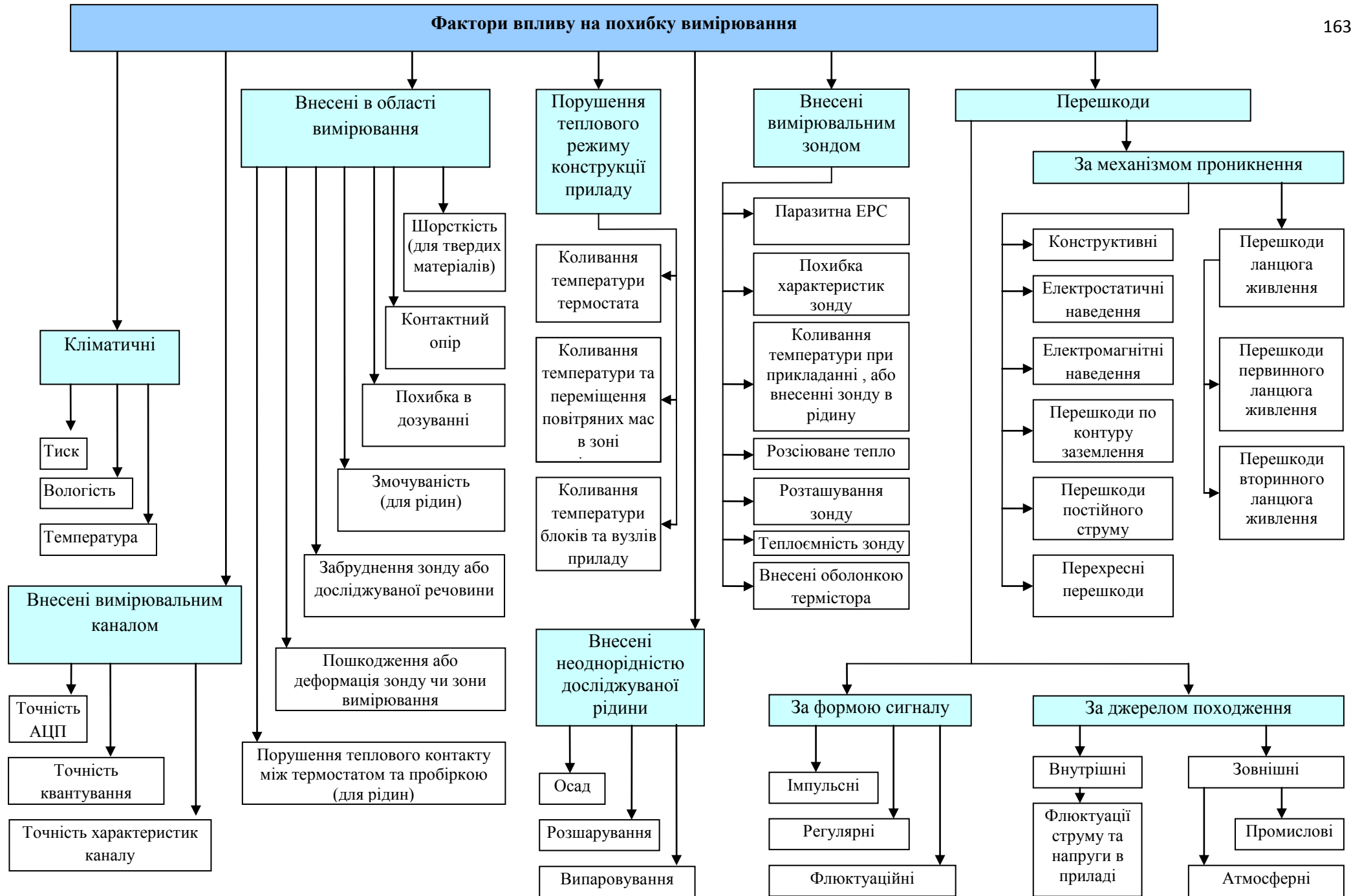
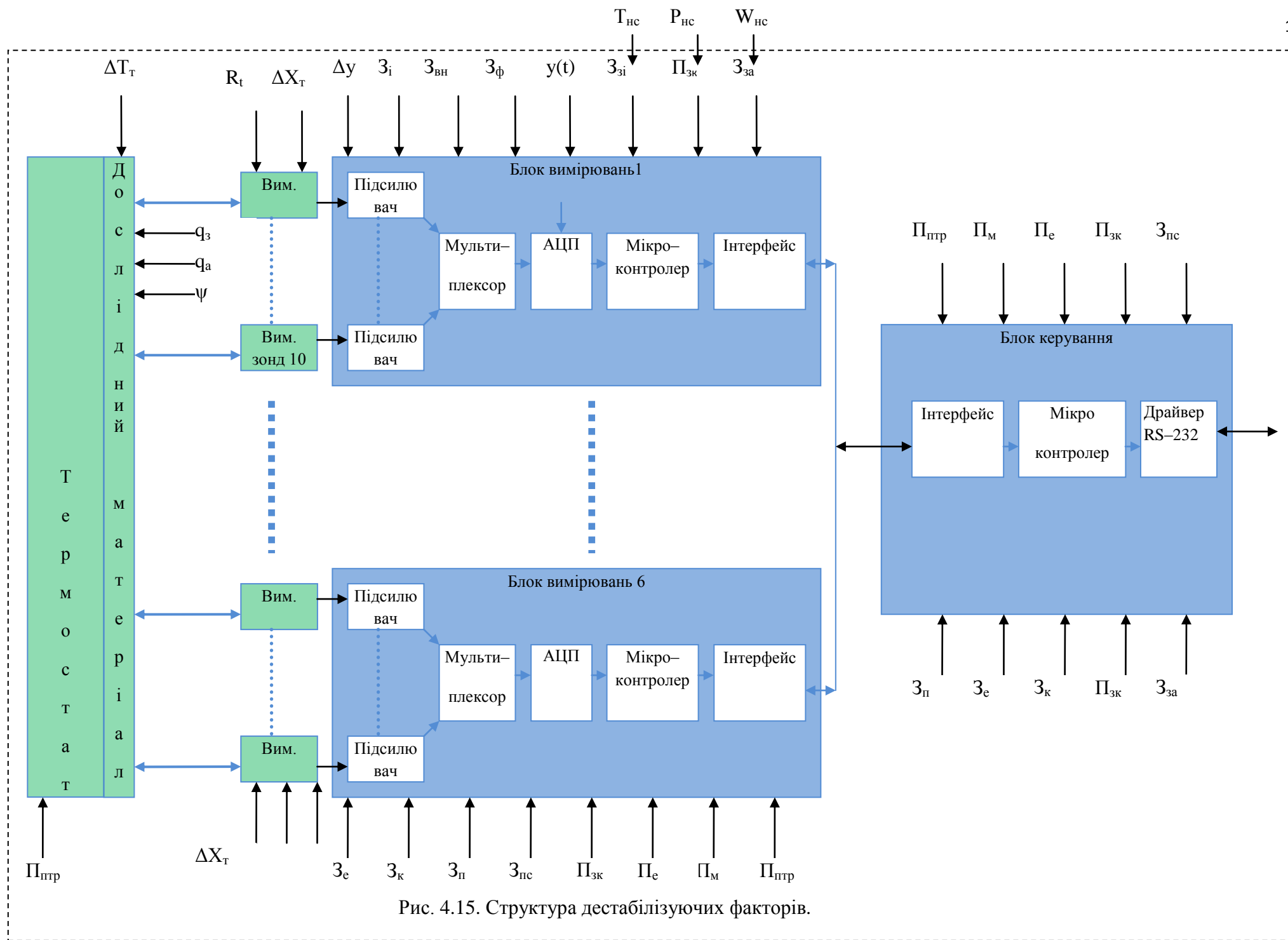


Рис. 4.14. Класифікація дестабілізуючих факторів.



На рис. 5.17 застосовано наступні позначення:

$T_{нс}$ – температура навколишнього середовища;

$P_{нс}$ – тиск навколишнього середовища;

$W_{нс}$ – вологість навколишнього середовища;

ψ – шорсткість поверхні досліджуваного матеріалу;

ΔX_m – зміна розташування зонду;

q_a – кількість тепла, що розсіюється з поверхні об'єкта за час експерименту;

q_z – кількість тепла, що поглинається зондом;

ΔT_T – зміна температури досліджуваного матеріалу при введенні вимірювального зонду (при контакті з зондом);

R_t – контактний термічний опір в області вимірювання;

Δy – похибка перетворення;

Z_i – імпульсні перешкоди, що впливають на роботу приладу;

Z_ϕ – флуктуаційні перешкоди що впливають на роботу приладу;

$y(t)$ – регулярні перешкоди, що впливають на роботу приладу;

Z_{zi} – зовнішні індустриальні перешкоди, створювані різноманітними електричними установками;

Z_k – кондуктивні перешкоди;

Z_e – перешкоди, обумовлені електричними наведеннями (ємнісними);

Z_n – перехресні перешкоди;

$Z_{нс}$ – перешкоди постійного струму, паразитні термо-ЕРС, що виникають у термоелектричних ланцюгах;

$P_{зк}$ – перешкоди, що викликані наявністю заземлених контурів;

P_e – перешкоди, що пов'язані з електроживленням;

P_m – перешкоди, що обумовлені механічними впливами (удари, вібрація);

P_{nmp} – перешкода, що виникає в результаті порушення теплового режиму конструкції приладу.



Рис. 4.16. Заходи для зменшення похибки визначення приладом ТФХ досліджуваних речовин.

4.4. Похибка каналу вимірювання

Похибка роботи приладу внаслідок дії дестабілізуючих факторів на електронні вузли визначається за значенням величини розбалансу N вимірювального мосту в умовних одиницях на виході АЦП, що реєструється кожні 0,3 секунди протягом тривалості імпульсу розігріву. Для дослідження похибки, яку вносить АЦП та впливу різного роду перешкод проведено дослідження апаратної частини приладу. Для цього в якості елементів вимірювального мосту використано прецизійні резистори постійного опору.

Результати вимірювання розбалансу мосту на виході АЦП представлено на рис. 4.17 та 4.18.

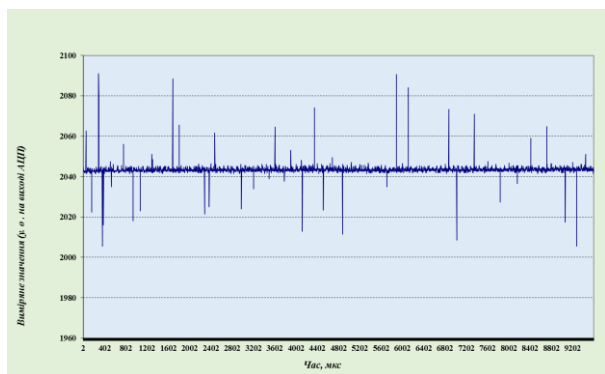


Рис. 4.17. Значення розбалансу вимірювального мосту на виході АЦП.

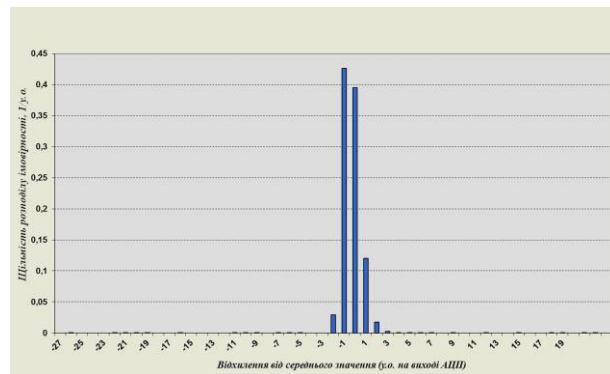


Рис. 4.18. Діаграма розподілу імовірності даних вимірювання.

Із наведених рисунків з даними вимірювання та діаграмою розподілу імовірності видно, що більше ніж 70% даних вимірювання знаходиться в області розкиду ± 1 у.о. Тому при попередній обробці результатів вимірювання з масиву отриманих даних за t -критерієм Стюдента виключено виміри, що вважаються недостовірними і вносять похибку в значення теплопровідності досліджуваного матеріалу.

Такий алгоритм видалення грубих похибок вимірювання реалізовано в програмі обробки результатів в мікроконтролерах вимірювальних каналів. Результати реалізації цього алгоритму в збільшеному масштабі наведено на рис. 4.19 та на рис. В.6 додатку В.

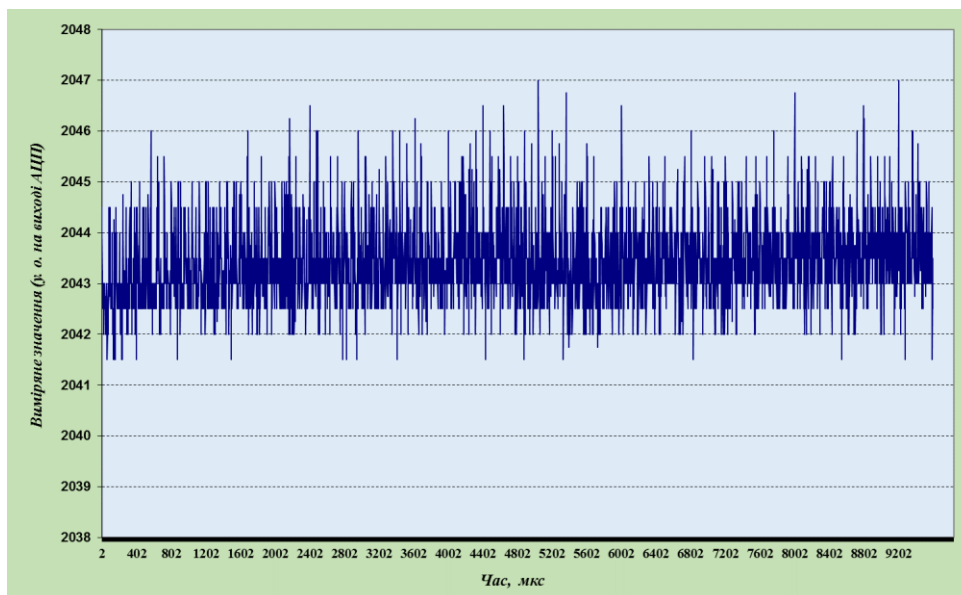


Рис. 4.19. Графік діапазону значень на виході АЦП при розігріві термісторів після виключення грубих похибок.

Проведені дослідження показали, що виключення грубих похибок дозволяє суттєво зменшити відносну похибку вимірювання. При цьому діапазон значень на виході АЦП зменшився до 6 у.о. (до $0,044^{\circ}\text{C}$).

На рис. В.7 Додатку В наведено спрощений алгоритм попередньої обробки даних в мікроконтролері вимірювального блоку.

4.5. Дестабілізуючі фактори, які впливають на чутливий елемент та зону вимірювання

При вимірюванні коефіцієнта теплопровідності речовин в процесі досліджень спостерігаються відхилення значень вимірювання від середньостатистичних. Характерні причини виникнення таких відхилень приведені на рис. 4.20, рис. 4.21 та рис. 4.22.

На рис. 4.20 показані значення температури розігріву 11 термісторів протягом шести сеансів вимірювання по 10 хвилин кожний в дистильованій воді. Як видно із графіків, чутливий елемент №1 був забруднений і в процесі вимірювання забруднення розчиняється в воді, тому вже після п'ятого сеансу температура розігріву стабілізується.

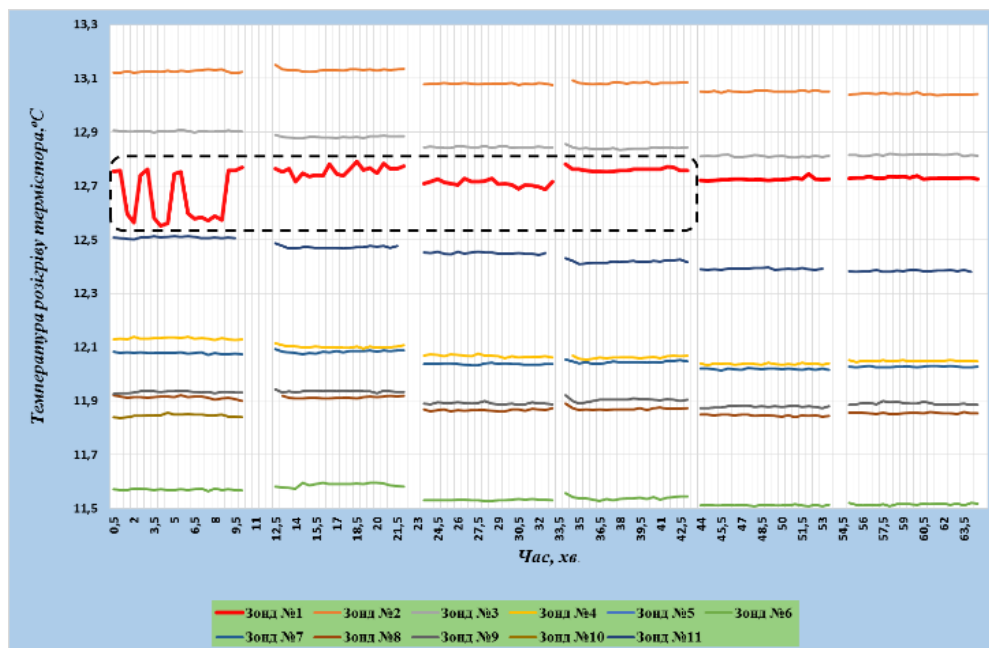


Рис. 4.20. Значення температури розігріву термісторів протягом шести сеансів вимірювання.

На рис. 4.21 наведено значення температури розігріву термісторів протягом одного сеансу вимірювання в дистильованій воді, з яких видно наявність різких змін значень одночасно у всіх восьми зондах. Це свідчить про те, що дана перешкода діє на всі вимірювальні елементи одночасно. Це пояснюється коливанням напруги в мережі живлення пристрою. Така похибка усувається або при кінцевій обробці даних вимірювання, або використанням високоякісного джерела безперебійного живлення.

На рис. 4.22 представлено значення температури розігріву 20-ти термісторів протягом одного сеансу вимірювання в дистильованій воді. Тут спостерігається значне відхилення даних вимірювання одного із зондів. Це свідчить про те, що чутливий елемент має поганий тепловий контакт з досліджуваною речовиною. Виникає це явище внаслідок появи на поверхні зонду кульок повітря або жирних плям. Така похибка усувається додатковим обезжиренням зонду та його змащенням спеціальними речовинами.



Рис. 4.21. Значення температури розігріву термісторів протягом одного сеансу вимірювання в дистильованій воді з врахуванням похибки, що виникає в наслідок коливання напруги в мережі живлення приладу.

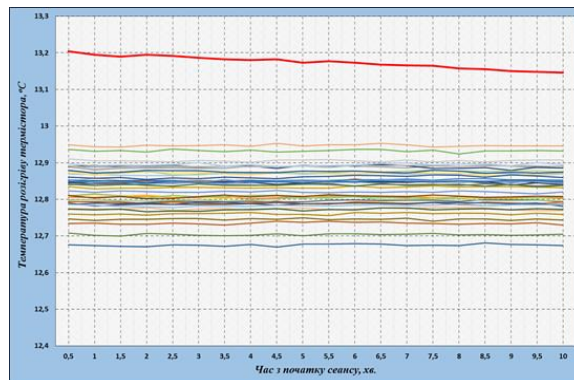


Рис. 4.22. Значення температури розігріву термісторів протягом одного сеансу вимірювання в дистильованій воді з врахуванням похибки, що виникає в наслідок появи на поверхні зонду кульок повітря або жирних плям.

4.6. Заходи зменшення похибки вимірювання

На етапі розробки приладу застосовано ряд способів зменшення похибки схемо-технічного, алгоритмічного та конструктивного характеру:

- в вимірювальному каналі використано комплектуючі електрорадіоелементи підвищеної точності;
- в якості підсилювача сигналу розбалансу мосту застосовано прецензійний підсилювач з високими статичними та динамічними характеристиками;
- для зменшення впливу різного роду перешкод вхідних ланцюгів та ланцюгів живлення використано фільтруючі елементи – RC фільтри, а в сигнальних ланцюгах вимірювальних каналів – застосовано резистори, з точністю $\pm 1\%$;
- для формування імпульсу напруги вимірювальному мосту, застосовано аналогові ключі, що мають низький опір відкритого ключа та з'єднані паралельно по чотири ключі для зменшення опору;
- для зменшення перешкод, які можуть впливати через сигнальні доріжки плати вимірювального блоку, всі вільні від доріжок місця зайняті полігоном, а в ланцюгах живлення встановлені фільтруючі елементи в вигляді RC- фільтрів;

- електрична схема термостату виконана таким чином, щоб нагрівання контейнера, в якому розміщуються досліджувані зразки, відбувалося плавно без різких коливань температури;

- для зменшення впливу навколишнього середовища на параметри вимірювання всі елементи приладу розміщені в шафі (рис. Б.3 Додатку Б);

- для обмежує фізичний вплив людини на положення касети касета з вимірювальними блоками, зонди яких під час вимірювання занурюється в досліджувані речовини, закрита кожухом, а опускання та піднімання касети відбувається за допомогою електричного двигуна з редуктором дистанційно за допомогою кнопок;

- картридж з досліджуваними зразками розміщено в термостаті і закрито від навколишнього середовища кожухом, а його механічна фіксація в вимірювальній зоні здійснюється спеціальним важелем з точністю $\pm 0,2$ мм;

- конструкція чутливих елементів (зондів) виконана конусної форми, що забезпечує центрування зондів в пробірках при їх опусканні;

- для точного дозування досліджуваних речовин в пробірки в комплект приладу входить дозатор.

За допомогою програмного середовища AutoCad виконано 3D-моделювання конструкції приладу, яка представлена на рис. В.8 та. В.9 Додатку В.

В разі потреби при вимірюванні теплових процесів одразу після змішування речовин передбачено механізм для фіксування дозатора в вільній зоні приладу. Це дозволяє швидко змішувати досліджувані речовини і переміщувати картридж з ними в зону вимірювання.

При вимірюваннях найбільш ефективним методом підвищення точності вимірювання є метод накопичення даних досліджень шляхом збільшення кількості сеансів вимірювання (збільшення часу сеансу вимірювання) з подальшою статистичною обробкою результатів (прямі вимірювання з багаторазовими спостереженнями, що регламентовані ДСТУ ГОСТ 8.207.2008) [129]. Для оцінки можливості підвищення точності таким шляхом проведено обчислення середніх значень по кожному із зондів за один,

два, три і п'ять сеансів вимірювання по 10 хвилин. Результати цих досліджень наведені в таблиці 4.4.

При розрахунку коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин використано середні значення для кожного із зондів за один 10-ти хвилинний сеанс вимірювання. Щільність розподілу імовірності середніх значень коефіцієнтів теплопровідності різних досліджуваних речовин, що виміряні за один сеанс по 10 хв. кожний, показана на рис. В.10 Додатку В. Для визначення похибки вимірювання для кожної із речовин проведено по 10 сеансів вимірювання і здійснено аналіз похибок за кілька сеансів та аналіз похибок при вимірюванні одночасно всіма зондами однієї і тієї ж досліджуваної речовини [102, 105]. Щільність розподілу імовірності середніх значень за сеанс коефіцієнтів теплопровідності однієї і тієї ж досліджуваної речовини, що визначена за 10 сеансів вимірювань по 10 хвилин кожен, наведена на рис. 4.23.

Для оцінки використання запропонованих методів і засобів підвищення точності проведено розрахунки виміряних значень коефіцієнта теплопровідності всіх досліджуваних речовин для 10, 20, 40, 60, 100 та 1200 виміряних термограм. На рис. 4.24 представлені графіки залежності похибки вимірювання коефіцієнта теплопровідності від його значення при різній кількості застосованих термограм.

Результати досліджень показали, що середнє значення похибки вимірювання за один сеанс вимірювання тривалістю 10 хвилин різними зондами не перевищувало 1,7%.

Таблиця 4.4. Результати вимірювання коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин [102, 105].

| Режим | | Дистильована вода | 0,9% розчин NaCl у воді | Молоко | 25% Розчин етилового спирту у воді | 60% розчин гліцерину в воді | 80% розчин гліцерину | 70% розчин етилового спирту в воді (Септол) | 75% розчин етилового спирту в воді | 96% розчин етилового спирту в воді |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|--------|------------------------------------|-----------------------------|----------------------|---|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 сеанс 10хв. | Значення, Вт/м*°K | 0,6288 | 0,6097 | 0,5632 | 0,4753 | 0,4001 | 0,3428 | 0,2671 | 0,2445 | 0,1741 |
| | Похибка, % | 1,09 | 1,64 | 1,25 | 0,92 | 1,24 | 1,22 | 1,23 | 1,19 | 1,8 |
| 2 сеанси по 10 хв. | Значення, Вт/м*°K | 0,6296 | 0,6113 | 0,5632 | 0,4751 | 0,3998 | 0,3428 | 0,267 | 0,2444 | 0,174 |
| | Похибка, % | 0,67 | 1,06 | 0,9 | 0,65 | 0,91 | 1,05 | 1,02 | 0,96 | 1,47 |
| 3 сеанси по 10 хв. | Значення, Вт/м*°K | 0,6295 | 0,6112 | 0,5632 | 0,4752 | 0,4001 | 0,3429 | 0,2672 | 0,2445 | 0,174 |
| | Похибка, % | 0,58 | 0,79 | 0,70 | 0,60 | 0,84 | 0,88 | 0,93 | 0,86 | 1,40 |
| 5 сеансів по 10 хв. | Значення, Вт/м*°K | 0,63 | 0,6109 | 0,5634 | 0,4753 | 0,4002 | 0,343 | 0,2672 | 0,2445 | 0,1740 |
| | Похибка, % | 0,55 | 0,66 | 0,58 | 0,52 | 0,78 | 0,74 | 0,83 | 0,78 | 1,25 |
| 1 сеанс по 10 хв. (одна речовина) | Значення, Вт/м*°K | 0,6288 | 0,6097 | 0,5632 | 0,4753 | 0,4001 | 0,3428 | 0,2671 | 0,2445 | 0,1741 |
| | Похибка, % | 0,38 | 0,4 | 0,38 | 0,46 | 0,48 | 0,44 | 0,48 | 0,65 | 0,99 |
| Довідникові дані, Вт/(м*°K) | | 0,628 | – | 0,564 | 0,477 | 0,399 | 0,336 | 0,259 | 0,245 | 0,175 |

В даній таблиці використано дані за матеріалами довідників [14, 35].

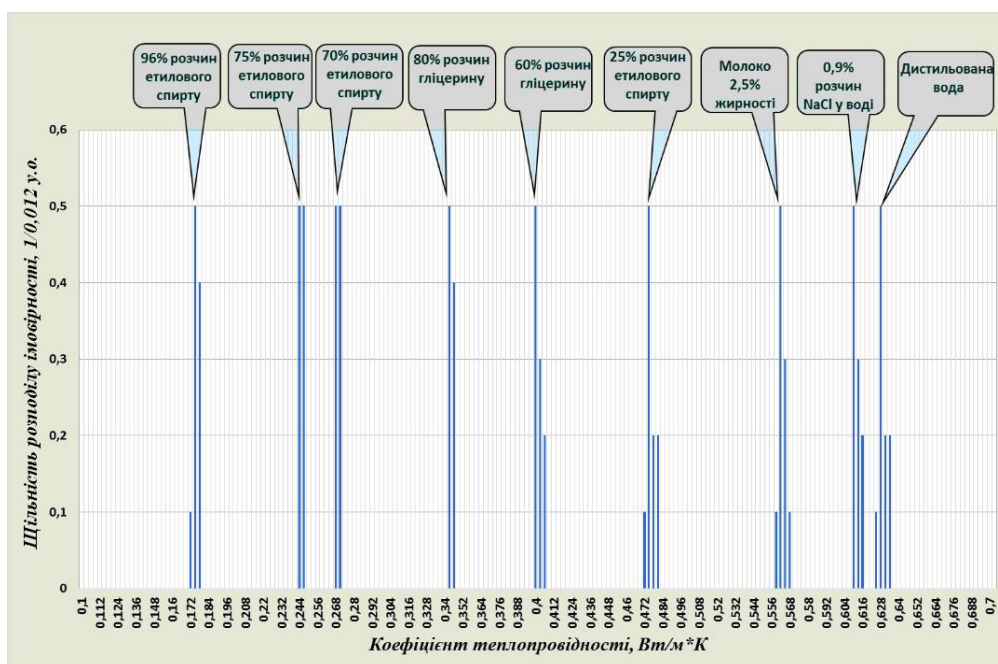


Рис. 4.23. Щільність розподілу імовірності середніх значень за сеанс коефіцієнтів теплопровідності однієї і тієї ж дослідної речовини, що визначена за 10 сеансів вимірювань по 10 хвилин кожний [102].

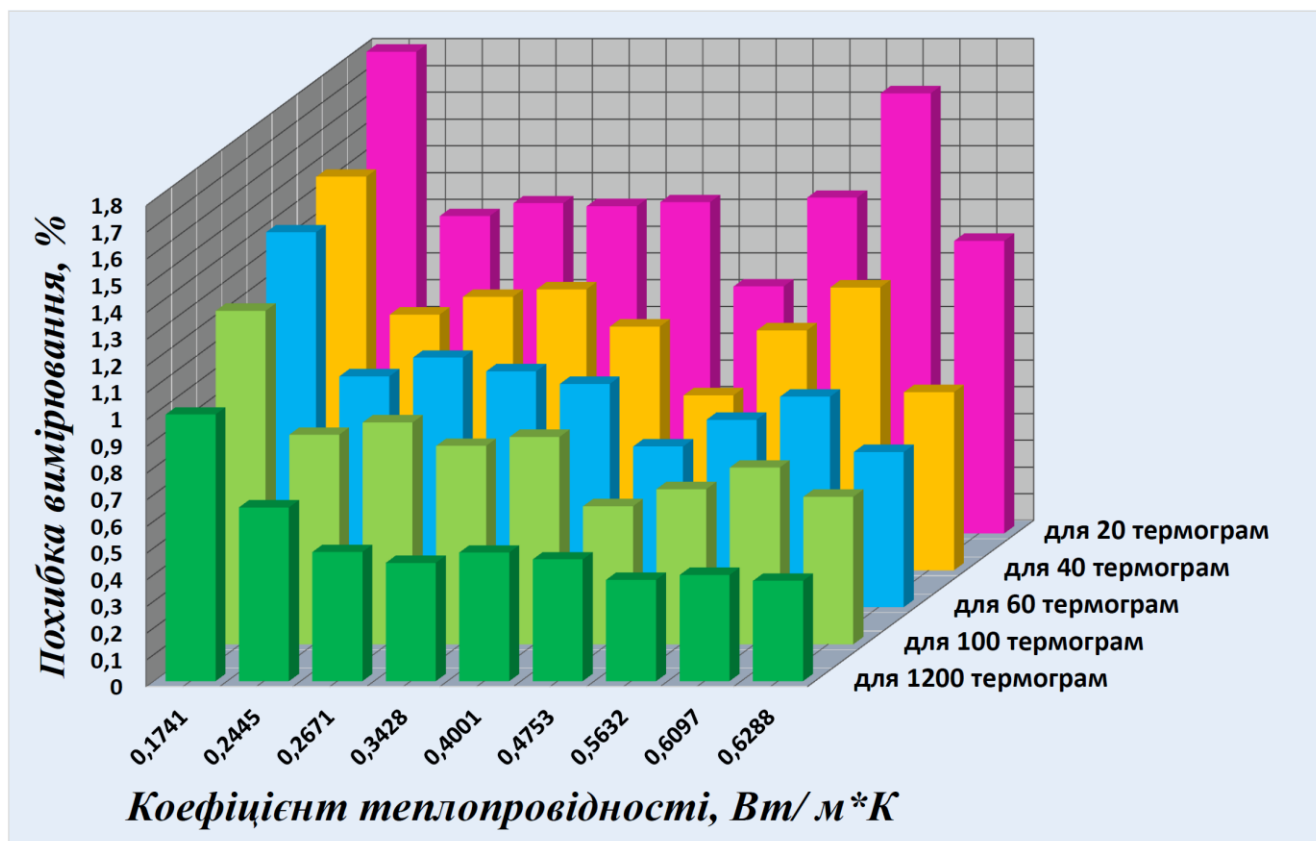


Рис. 4.24. Графіки похибок визначення коефіцієнта теплопровідності, де величина похибки показана для 20, 40, 60, 100 термограм, що виміряні одним зондом; а заленим кольором - для 20 термограм при вимірюванні 60 різними зондами одночасно однієї і тієї ж досліджуваної речовини (загальна кількість термограм, для яких проводилися розрахунки – 1200) .

Збільшення терміну сеансу вимірювання з наступним визначенням середніх значень результатів дозволяє значно підвищити точність вимірювання. Але при цьому збільшується час проведення досліджень [102, 105]. Якщо вимірювання проводити всіма 60-ти зондами однієї і тієї ж досліджуваної речовини, тоді похибка не перевищує 1,5%.

Порівняльний аналіз похибок вимірювання теплопровідності запропонованим методом та іншими методами за даними літературних джерел, що надано в п.п. 1.6 розділу 1, наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5. Порівняльні значення похибок вимірювання теплопровідності речовин, що визначені за методом прямого підігріву термістора, та іншими видами методів.

| Спосіб | Визначена похибка, % | Похибка способу за даними літератури, % | Примітка |
|---|--|--|-------------------------|
| За температурою розігріву термістора | 3,5% -7% в діапазоні 0,1-0,7 Вт/м·К | 3% - 4% в діапазоні 0,3-1,5 ккал/см·сек·°С | [50,51] ¹ |
| За термограмою розігріву термістора протягом імпульсу розігріву | 3,2% - 6,0% в діапазоні 0,1-0,7 Вт/м·К | 2,9% - 6,1% в діапазоні 0,3-0,5 Вт/м·К | [45,46,81] ² |
| За відношенням температури розігріву в досліджуваній речовині порівняно з еталонною речовиною | 3,0% - 5,0% в діапазоні 0,1-0,7 Вт/м·К | --- | [83] ³ |
| За відношенням потужності розігріву термістора до однієї і тієї ж температури в досліджуваній та еталонній речовинах | 4% - 8,0% в діапазоні 0,1-0,7 Вт/м·К | --- | [85] ³ |
| За температурою розігріву термістора визначеною за термограмою з корекцією за значенням температури досліджуваної речовини та зміни потужності в процесі нагрівання | < 2,0% в діапазоні 0,1-0,7 Вт/м·К | < 2,0% в діапазоні 0,1-0,7 Вт/м·К | [105] ⁴ |

Примітки:

1 – метод застосовувався для вимірювання ґрунту вологістю 3%, 17% та 26% [50, 51]. В якості еталонних рідин використовувалися вода та силіконове масло. Авторами зауважено, що виміряна похибка >10% вважалась хибною і вилучалась при подальших розрахунках.

2 – метод застосовувався для вимірювання розчинів гліцерину в воді [45, 46, 81] теплопровідністю 0,605 Вт/м·К у пропорціях 90/10, 68/32, та 47/53.

3 – авторами в літературі не наводяться результати досліджень визначення похибки вимірювання.

4 – результати приведених досліджень співпадають з результатами проведених раніше досліджень.

В результаті впровадження комплексу засобів, що зменшують вплив різноманітних факторів на похибку вимірювання ТФХ, вдалося значно підвищити точність приладу завдяки зниженню похибки визначення напруги в діагоналі вимірювального мосту, яка обумовлена дією дестабілізуючих факторів на апаратну частину приладу (канали вимірювання, мультиплексор, АЦП, мікроконтролер).

Експериментальні і теоретичні дослідження показали, що вплив таких дестабілізуючих факторів як зміна положення зонду, атмосферний тиск можна не враховувати, тому що він є незначним.

Також для зменшення загальної похибки вимірювання теплопровідності речовин доцільно:

- проводити перед кожним вимірюванням контроль рівня досліджуваної речовини в пробірці, щоб уникнути впливу похибки її дозування;
- застосовувати дозуючі пристрої і елементи до них, що призначені для дозування речовин відповідної густини;
- проводити регулярне промивання та обезжирювання зондів для уникнення похибки, яка виникає в наслідок їх забруднення;
- уникати механічних пошкоджень поверхні зондів;
- у випадку вимірювання ТФХ досліджуваних речовин, які складаються з фракцій з різною густиною або мають властивість розшаровуватися обов'язково перед дослідженням необхідно їх перемішати за допомогою шейкера та підігрівати до необхідної температури;
- при дослідженні розчинів, що легкозаймисті та які виготовляються безпосередньо перед вимірюванням необхідно обов'язково дотримуватися правил розчинення хімічних речовин та правил протипожежної безпеки.

Таким чином, аналіз дестабілізуючих факторів, що впливають на зонд та блоки приладу, і застосування методів, що дозволяють усунути вплив цих факторів на одержання достовірної інформації про температурне поле в області виміру, сприяють підвищенню точності визначення теплопровідності речовин і дозволяють підвищити метрологічний рівень визначення теплопровідності речовин, зменшивши загальну похибку вимірювання до 1,5%.

Висновки до розділу

1. Представлена послідовність проведення досліджень при визначенні теплопровідності речовин методом прямого підігріву термістора, що дозволяє визначити раціональну тривалість їх виконання.

2. Вибрано режими роботи створеного багатоканального приладу, що дало змогу ефективно його використовувати для визначення теплопровідності різноманітних речовин.

3. Наведено дані тестових досліджень з використанням еталонних речовин з відомими ТФХ, за результатами яких визначено числові значення корегуючих коефіцієнтів, що необхідні для розрахунку теплопровідності досліджуваних речовин.

4. Представлено результати вимірювання теплопровідності досліджуваних речовин з коефіцієнтами в діапазоні від 0,1 Вт/м*К до 1,0 Вт/м*К, що підтвердило можливість використання вдосконаленого методу та розробленого приладу для визначення теплопровідності досліджуваних речовин.

5. Виконано дослідження впливу дестабілізуючих факторів та причин їх виникнення, що впливають на похибку вимірювання і визначено засоби підвищення точності розрахунку теплопровідності досліджуваних речовин. При цьому похибка вимірювання теплопровідності, що сягала від 3% до 8% при використанні відомих методів, зменшена до 1,5% шляхом застосування запропонованого методу прямого підігріву термістора.

РОЗДІЛ 5.

ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ ВДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ РЕЧОВИН В РІЗНИХ АГРЕГАТНИХ СТАНАХ

Розглянута можливість застосування вдосконаленого методу визначення та контролю складу речовин в біології та медицині, а саме – для виявлення імунологічної реакції біологічних проб. Представлено результати досліджень імунологічної реакції пацієнтів на найбільш поширені алергени.

Представлено експериментальну установку для вимірювання ТФХ твердих матеріалів, яку доцільно застосовувати для контролю їх складу. Наведено результати досліджень з використання методу прямого підігріву термістора для вимірювання ТФХ твердих матеріалів та за результатами досліджень запропоновано шляхи зменшення похибки вимірювання даним методом.

5.1. Області застосування вдосконаленого методу та розробленого приладу

Створений прилад, в основу роботи якого покладено метод прямого підігріву термістора, має ряд переваг в порівнянні з існуючими приладами, а саме:

- прилад не має складних та високовартісних елементів;
- дозволяє одночасно вимірювати ТФХ декількох десятків досліджуваних зразків;
- потребує малого об'єму досліджуваного зразка;
- забезпечує високу точність вимірювання;
- має короткий термін процедури вимірювання.

Враховуючи вищенаведені переваги, прилад може застосовуватись за необхідністю швидкого дослідження великої кількості зразків і при малому об'ємі досліджуваних матеріалів, а саме:

- в біології та медицині, де об'єм досліджуваних зразків обмежений для вимірювання ТФХ біологічних матеріалів [17-22, 46-50, 93, 130-132], зокрема, для

визначення імунологічних реакцій шляхом порівняння ТФХ сумішей кров+алерген [17-22, 93, 130-132] ;

- в хімічній промисловості для визначення ТФХ рідких теплоізолюючих та теплопровідних полімерних композитів, спеціальних лаків та фарб, які повинні мати відповідні ТФХ [133];

- в харчовій промисловості для визначення ТФХ харчових продуктів, що є важливим при їх тривалому зберіганні. Помилкове визначення ТФХ призводить до порушень параметрів виробничого процесу і додаткових витрат, в тому числі наднормативних витрат електроенергії, підвищення собівартості та зниження якості продукції, що випускається [15, 16];

- в автомобільній галузі з метою розробки сучасних інноваційних охолоджуючих речовин для систем високофорсованих теплоенергетичних пристроїв та контролю якості охолоджуючих речовин та мастил при експлуатації автотранспорту [26];

- для одержання ТФХ речовин при виконанні теплових розрахунків [16] холодильного обладнання;

- в будівельній галузі для контролю ТФХ рідких теплоізолюючих та теплопровідних матеріалів [133], що застосовуються при будівництві;

- для контролю походження діамантів неруйнівним методом [134], оскільки природні діаманти мають значно більший коефіцієнт теплопровідності, ніж штучні;

- для дистанційного контролю вологості будівельних конструкцій історичних споруд [135].

З метою розширення області застосування запропонованого методу визначення теплопровідності різноманітних матеріалів виконано практичну апробацію для вимірювання ТФХ твердих, умовно твердих та сипучих матеріалів [136]. Для цього розроблено конструкцію чутливого елемента, що має плоску поверхню теплового контакту з досліджуваним матеріалом [137]. Схеми дослідження ТФХ твердих матеріалів наведено на рис. 5.1, а сипучих матеріалів – на рис. 5.2.

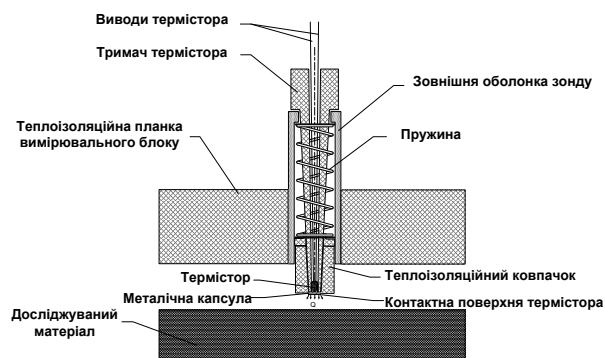


Рис. 5.1. Схема дослідження ТФХ
твердих матеріалів [137].

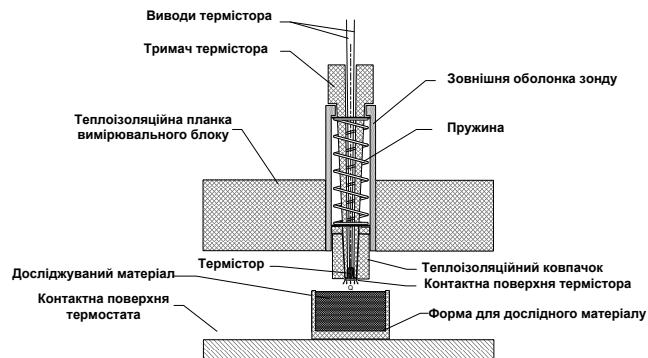


Рис. 5.2. Схема дослідження ТФХ
сипучих матеріалів [137].

Тверді матеріали мають діапазон значень коефіцієнта теплопровідності від $0,03 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$ до $3000 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$, який значно ширший діапазону значень коефіцієнта теплопровідності речовин. Тому для забезпечення точності вимірювання в такому широкому діапазоні необхідно використовувати термістори різної потужності. Для вимірювання матеріалів з більшим коефіцієнтом теплопровідності, ніж у речовин (більше $1,0 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$), потрібна більша потужність термістора. Але при збільшенні потужності термістора внаслідок неякісного теплового контакту термістора з досліджуванним матеріалом його температура може перевищити допустиме значення і термістор вийде з ладу. В цьому випадку необхідно передбачити вимкнення процесу подачі імпульсу нагріву на термістор при перевищенні гранично допустимої температури.

При вимірюванні матеріалів з коефіцієнтом теплопровідності меншим, ніж $0,1 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$, необхідно застосовувати потужність термістора меншу, ніж та, яка використовується при вимірюванні ТФХ речовин (30 мВт).

Для вимірювання ТФХ твердих матеріалів запропонована нова конструкція контейнера термостата відповідно до форми досліджуваних зразків. Температуру досліджуваного зразка, при якій проводяться вимірювання, можна збільшити шляхом застосування термостата з регульованою температурою. В цьому випадку температура термостата встановлюється за допомогою програми керування пристроєм. Якщо вимірювання ТФХ досліджуваних зразків необхідно проводити

при температурі, яка нижче ніж температура навколишнього середовища, то для цього необхідно в термостаті замінити нагрівач на батарею, робота якої заснована на елементах Пельтьє. Вони забезпечують зниження температури досліджуваних зразків до 0 °С. Для охолодження досліджуваних зразків батарея на елементах Пельтьє розташовується на радіаторі.

Таким чином, для використання приладу для вимірювання різноманітних матеріалів як рідких, так і твердих, що мають широкий діапазон значень теплопровідності, необхідно мати різні модифікації чутливих елементів. Поділ їх на групи за модифікацією забезпечує необхідні вимоги до конструкції приладу. З врахуванням вимог до умов свого застосування прилад може бути виготовлений за замовленням з необхідною кількістю зондів відповідної модифікації.

5.2. Визначення імунологічної реакції при аналізі біологічних проб

Запропонований метод визначення теплопровідності матеріалів використано в медико-біологічних дослідженнях [110, 130, 131]. Так, з метою виявлення імунологічних реакцій пацієнтів шляхом вимірювання теплофізичних характеристик крові в суміші з алергенами проведено визначення коефіцієнта теплопровідності крові донорів; коефіцієнта теплопровідності алергенів (м'яса свинини, м'яса яловичини, квасолі, яблук, гороху, курячих яєць, малини, помідор, кави, пшеничної муки, апельсину, цибулі та ін.); коефіцієнта теплопровідності 0,9% розчину NaCl (фізіологічного розчину); коефіцієнта теплопровідності суміші кров+алерген різних донорів.

При дослідженнях венозна кров пацієнта змішувалася в пропорції 50% на 50% з алергеном. Для запобігання згортанню крові, донорську кров піддавали процедурі декальцинації крові (в кров було додано 3,6%- розчин цитрату натрію в дистильованій воді (17%), який поглинає іони кальцію і насичує кров іонами натрію) [138].

Всі маніпуляції і вимірювання проводились з компонентами, які перед вимірюванням нагрівались в термостаті до температури $T = +(37 \pm 0,5)^\circ\text{C}$. Як тільки вимірюваний обсяг прогрівався до температури $+37,0^\circ\text{C}$ (температура

контейнера з сумішами контролювалась за значеннями індикатора на передній панелі приладу) за командою ПК запускався сеанс вимірювання. Одержані дані накопичувались в ПК в вигляді файлу даних. Після завершення сеансу за допомогою програми обробки даних виконано розрахунок значень коефіцієнта теплопровідності для кожної із досліджуваних сумішей.

Дослідження проведено з використанням крові дванадцяти донорів. В результаті досліджень крові перших шести донорів виявлено, що за час розливання крові по пробірках, її підігріву та подальшого сеансу вимірювання спостерігається розшарування суміші та неповна декальцинація крові [138] (рис. Г.1а,б Додатку Г). Більш важкі компоненти крові осідали з часом на дно пробірки та утворювали згустки крові, що призводило до значної похибки при вимірюванні [131], оскільки більш важкі компоненти крові мають меншу теплопровідність ніж плазма з алергенами. На рис. Г.2 Додатку Г представлена діаграма розподілу імовірності значень в випадку розшарування суміші в об'ємі 170 мкл. З діаграми видно, що виміряні значення теплопровідності знаходяться в межах між значеннями коефіцієнтів теплопровідності крові та 0,9% розчину NaCl. Значення коефіцієнта теплопровідності крові та плазми крові взято за даними з робіт інших дослідників [57, 132]. Широкий діапазон розподілу значень зумовлений висотою розташування термістора зонду в пробірці. Він, при невеликій кількості досліджуваної суміші, знаходиться на межі розподілу суміші. Його положення залежить від довжини зонда і висоти розташування пробірки в лунці картриджу термостата. Якщо термістор знаходиться ближче до дна пробірки, де при розшаруванні суміші осідають більш важкі компоненти крові, то виміряний коефіцієнт теплопровідності менший ніж той, коли термістор знаходиться в верхньому шарі суміші. Тут знаходиться суміш плазми крові, алергену та 3,6% розчину цитрату натрію, яка має порівняно вищий коефіцієнт теплопровідності. Враховуючи те, що досліджувана суміш крові з алергеном змішувалася в пропорції 50% на 50%, то в деяких випадках виміряне значення теплопровідності досягало значення коефіцієнта теплопровідності 0,9% розчину NaCl. Враховуючи встановлені недоліки, подальші вимірювання коефіцієнта теплопровідності

сумішей кров+алерген №7-12 донорів проведено з застосуванням попередньої процедури перемішування вимірювального об'єму перед сеансом вимірювання, а також збільшено об'єм досліджуваної суміші до 350 мкл та збільшено до 37,5% об'єм розчину цитрату натрію (на 5 мл крові 3 мл розчину).

На рис. Г.3 та Г.4 Додатку Г представлено діаграми розподілу імовірності значень коефіцієнта теплопровідності, які отримано в процесі вимірювань. Числові значення коефіцієнта теплопровідності, що одержані при проведенні дослідження, разом з довідковими даними приведено в таблиці Г.1 Додатку Г. З діаграм видно, що виміряні значення теплопровідності сумішей кров+алерген знаходяться в межах між значеннями коефіцієнтів теплопровідності крові та плазми, а виміряні значення теплопровідності алергенів – між значеннями коефіцієнтів теплопровідності плазми та дистильованої води. Порівнявши середньоквадратичні відхилення, маємо, що $\sigma_{\text{кров+алерген}} > \sigma_{\text{алерген}} > \sigma_{\text{кров+фізрозчин}}$. Це підтверджує наявність імунологічної реакції при порівнянні значень коефіцієнтів теплопровідності сумішей кров+алерген з коефіцієнтом теплопровідності контрольної рідини (середнє значення теплопровідності суміші кров+фізрозчин), що показано на рис. 5.5 та рис. 5.6. Результати порівняння виміряного коефіцієнта теплопровідності суміші кров+фізрозчин різних донорів та коефіцієнта теплопровідності 0,9% розчину NaCl (фізрозчину) приведено на рис. 5.3, а виміряного коефіцієнта теплопровідності алергенів та коефіцієнта теплопровідності фізрозчину – приведено на рис. 5.4. За даними досліджень значення коефіцієнта теплопровідності крові різних пацієнтів коливається в межах $\pm 2\%$ [57, 130, 131], а середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів теплопровідності різних алергенів знаходиться в межах $\pm 2,6\%$.

В ході досліджень в сумішах крові донорів №7-13 з різними алергенами: вишні, діні, малини, чаю зеленого та чаю чорного амплітуда відхилень коефіцієнтів теплопровідності від коефіцієнта порівняно з теплопровідністю контрольної рідини (середнє значення теплопровідності суміші кров+ фізрозчин) не перевищувала похибки вимірювання..

Результати вимірюного відхилення коефіцієнта теплопровідності суміші крові різних донорів та алергенів «пшеничне борошно» та «кава», порівняно з теплопровідністю контрольної рідини (середнє значення теплопровідності суміші кров+ фізрозчин) на рис 5.6.

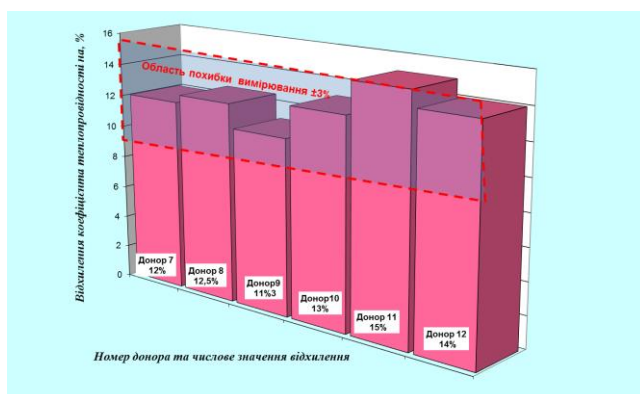


Рис. 5.3. Діаграма значень коефіцієнта теплопровідності крові донорів (у %) порівняно з теплопровідністю фізрозчину [130].

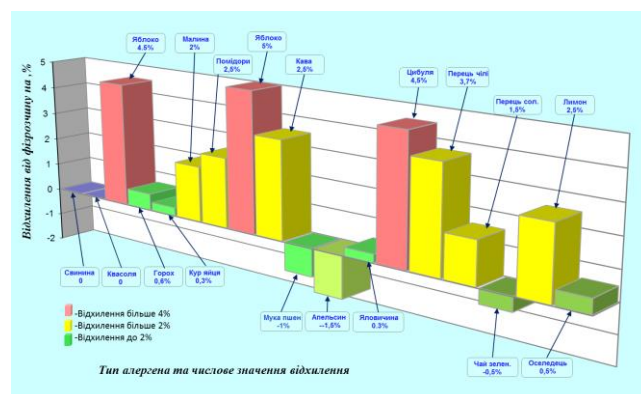


Рис. 5.4. Діаграма значень коефіцієнта теплопровідності різних алергенів (у %) порівняно з теплопровідністю фізрозчину.

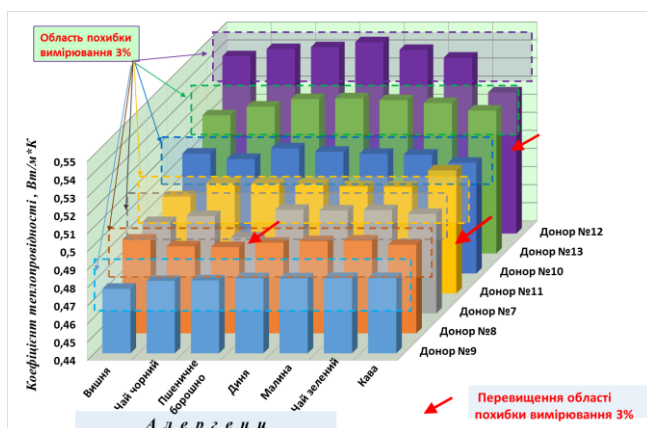


Рис. 5.5. Діаграма значень коефіцієнта теплопровідності суміші кров+алергени різних донорів.

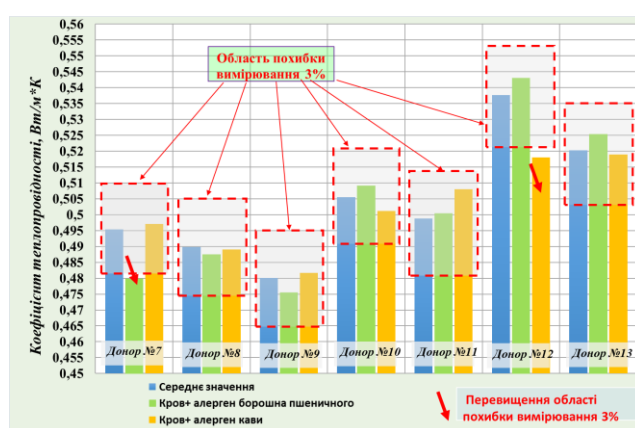


Рис. 5.6. Діаграма значень коефіцієнта теплопровідності суміші кров+алерген кави та пшеничної муки донорів порівняно з теплопровідністю контрольної рідини (середнє значення теплопровідності суміші кров+ фізрозчин).

У виміряному значенні коефіцієнта теплопровідності суміші крові донора № 7, алергенів пшеничного борошна та кави у суміші крові донора №12 з алергеном кави спостерігається суттєве відхилення значення коефіцієнта теплопровідності.

Проведені дослідження показали, що запропонованим методом можна проводити вимірювання коефіцієнта теплопровідності біологічних матеріалів і за даними вимірювання визначити наявність та ступінь алергічних реакцій.

Враховуючи те, що кров різних донорів і алергени мають різні коефіцієнти теплопровідності, при визначенні ступеню імунологічної реакції необхідно вводити відповідні корегуючі коефіцієнти.

Запропонований спосіб визначення наявності та ступеню імунологічної реакції для розчинів біологічних проб полягає в порівнянні значень математичного очікування коефіцієнтів теплопровідності, коефіцієнта асиметрії розподілення значень та середнього статистичного відхилення, що одержаних в результаті аналізу даних контрольних вимірювань та значень даних вимірювання з поправкою на зміну значення математичного очікування коефіцієнтів теплопровідності, викликану властивостями конкретної біологічної проби і представлено в [95].

5.3. Визначення теплопровідності твердих матеріалів

Для вимірювання коефіцієнта теплопровідності твердих матеріалів створено експериментальну установку [106], загальний вигляд якої приведено на рис. 5.7. Експериментальна установка складається з вимірювального блоку, блоку живлення, блоку зондів та термоелектричного нагрівача-охолоджувача. Зовнішній вигляд вказаних складових елементів установки представлено на рис. Г.5, Г.6, Г.7 Додатку Г відповідно.

Структурну схему експериментальної установки для вимірювання теплопровідності твердих матеріалів представлено на рис. 5.8.

Обробка даних вимірювання та розрахунок теплофізичних характеристик досліджуваних матеріалів здійснюється за допомогою створеної програми «Analyser_2015 TM».

Принцип дії експериментальної установки аналогічний розробленому приладу для вимірювання теплопровідності речовин. Для проведення досліджень в широкому діапазоні температур в установці використано термоелектричний охолоджувач-нагрівач на елементах Пельтьє. Цей пристрій забезпечує нагрів або охолодження досліджуваних зразків при вимірюванні теплопровідності матеріалів в діапазоні від $+10^{\circ}\text{C}$ до $+40^{\circ}\text{C}$. Його живлення здійснюється від окремого блоку.

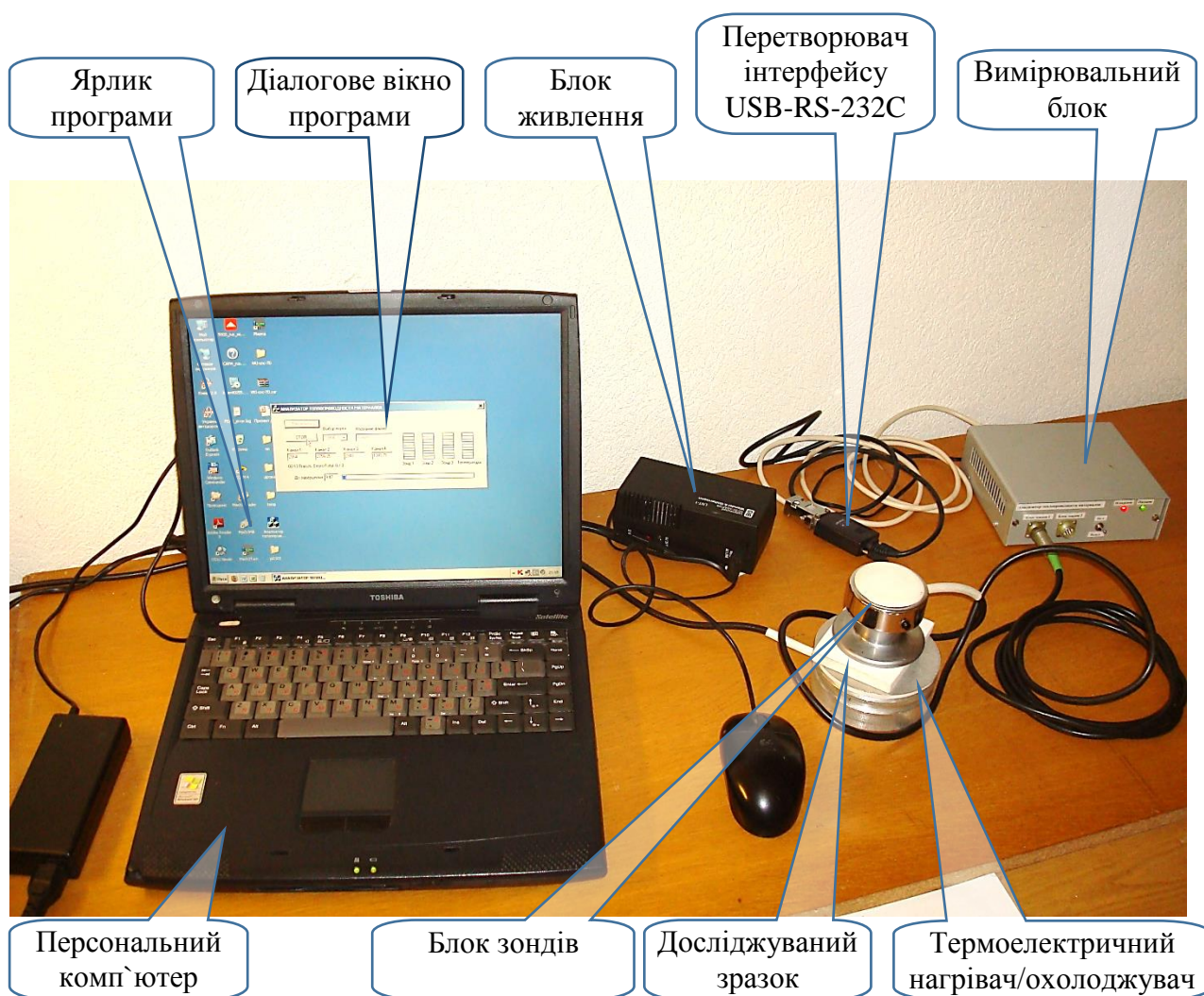


Рис. 5.7. Загальний вигляд експериментальної установки для вимірювання коефіцієнта теплопровідності твердих матеріалів [106].

Блок зондів складається з чотирьох зондів. Три зонди, що мають опір 2 кОм , що використовуються для вимірювання ТФХ матеріалу, а четвертий з високим опором 10 кОм – для вимірювання температури досліджуваного зразка. Завдяки високому опору через нього проходить невеликий струм, тому відсутнє явище

саморозігріву термістора. Три термістори ввімкнені в плечі вимірювальних мостів.

Вимірювальні зонди конструктивно об'єднано в один блок, загальний вигляд якого наведено на рис. 5.9. Кожний термістор вмонтовано в металеву капсулу (рис. 5.10), яка має контактну площину для притискання до досліджуваного матеріалу. Тримачі з термісторами розміщено в циліндричних колбочках, в які вставляється пружина, що притискається знизу фіксатором, приклеєним до конусоподібного тримача. Всі чотири циліндричні колбочки зондів приклеюються до ПВХ пластини, що має низьку теплопровідність. Вона вставляється в корпус блоку зондів. Виводи термісторів під'єднано до багатожильного кабелю, який підключається до вимірювального блоку. Корпус блоку зондів з термісторами розміщується на пласкій поверхні досліджуваного матеріалу. При вимірюванні ТФХ капсули зонду контактною площиною надійно притискаються пружиною до досліджуваного матеріалу.

Для зміни температури досліджуваного зразка в установці використовується термоелектричний охолоджувач-нагрівач з окремим блоком живлення. При пропусканні через нього струму в прямому напрямку його верхня площина нагрівається, а в зворотному – площина охолоджується. Величина струму змінює інтенсивність охолодження або нагрівання поверхні.

Процес вимірювання ТФХ твердих матеріалів реалізовано аналогічно процесу вимірювання теплопровідності речовин.

Для роботи з експериментальною установкою розроблено програму керування процесом дослідження (рис 5.11). При запуску процесу досліджень з передньої панелі експериментальної установки за командою, що надходить з ПК, на екрані монітора з'явиться інтерфейсне вікно для встановлення параметрів проведення досліджень та ініціалізації роботи установки.

В цьому вікні вказується порт, до якого підключена експериментальна установка, вводиться назва файлу для збереження результатів дослідження, здійснюється ініціалізація установки.

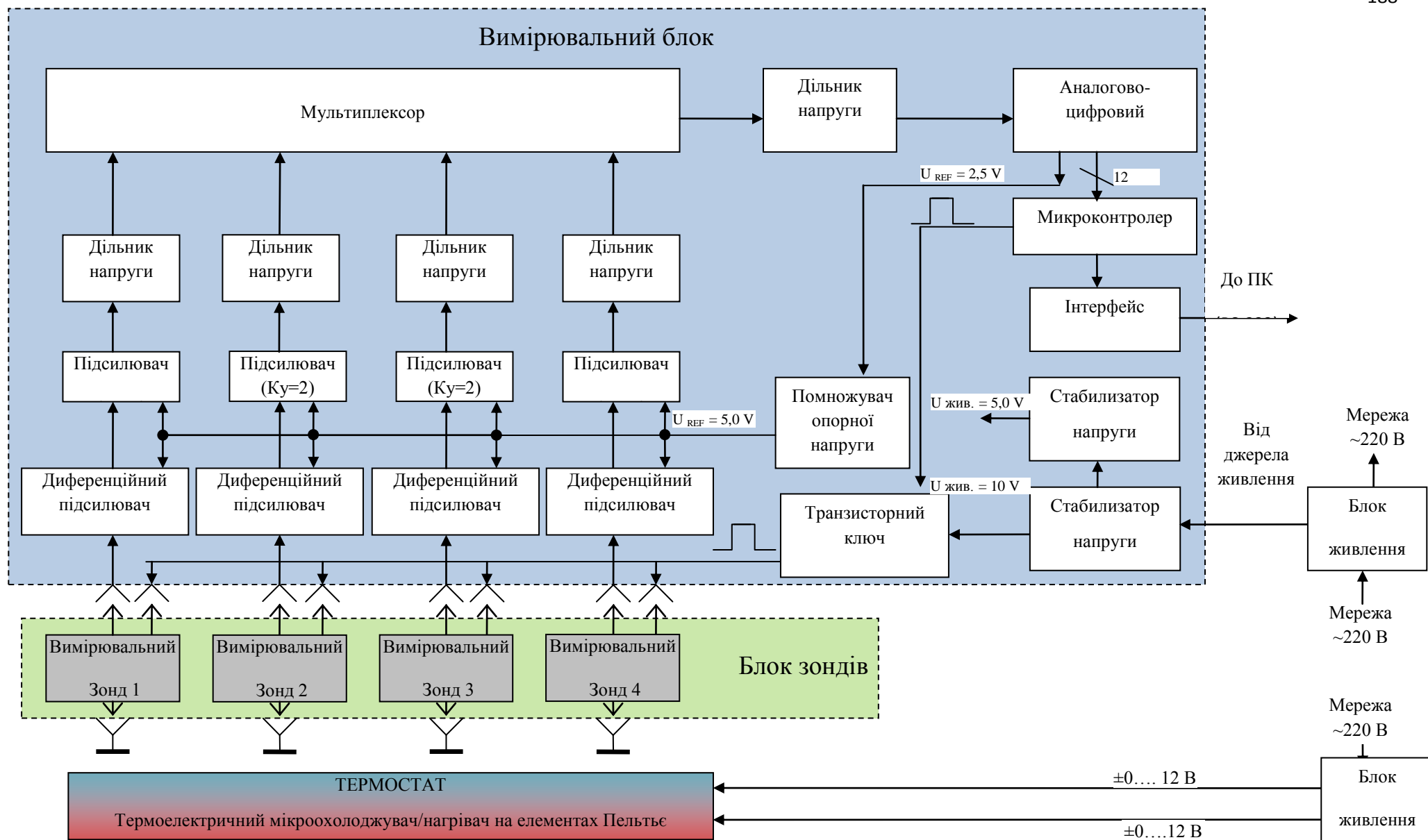


Рис. 5.8. Структурна схема експериментальної установки для вимірювання теплопровідності твердих матеріалів.

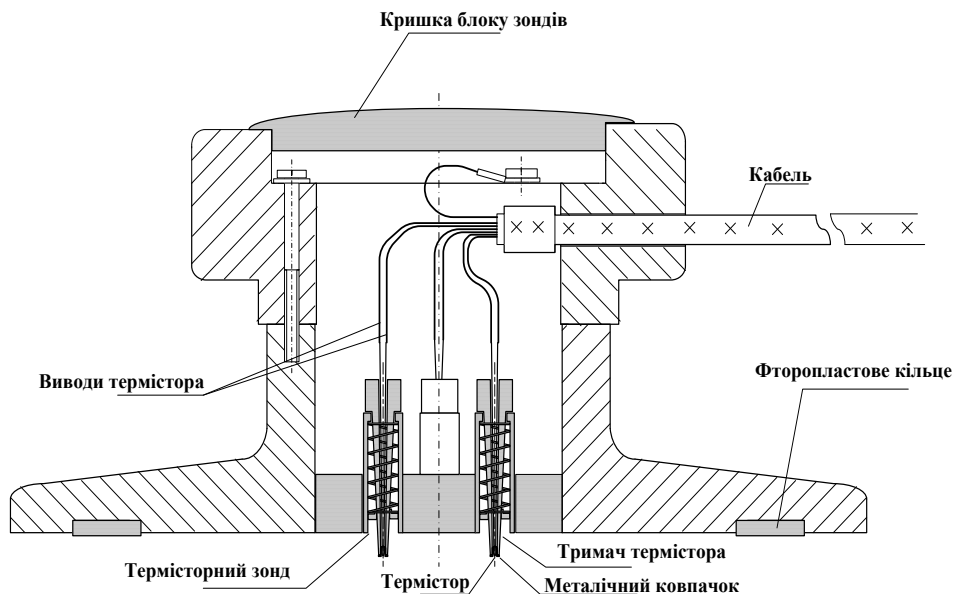


Рис. 5.9. Загальний вигляд блоку зондів [136].



Рис. 5.10. Термістор в металевій капсулі.

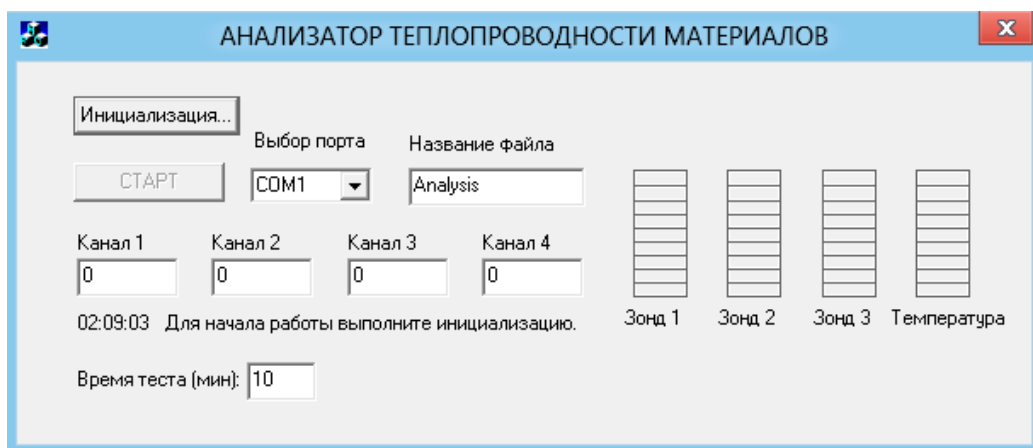


Рис. 5.11. Діалогове вікно програми керування експериментальною установкою.

Після натискання кнопки "Старт" розпочинається процес вимірювання і у віконцях "Канал 1,2,3,4" з'являться виміряні значення теплопровідності матеріалу для кожного із зондів з періодичністю в 1 сек. По закінченню сеансу дослідження отримуємо файл з результатами вимірювання.

Вимірювальний блок експериментальної установки має два входи для підключення зондів - "Блок зондів 1", "Блок зондів 2". Вхід "Блок зондів 1" призначено для вимірювання теплопровідності матеріалів з високою

теплопровідністю (більше, ніж $1.0 \text{ Вт/м}^*\text{К}$), а вхід "Блок зондів 2" – для вимірювання теплопровідності матеріалів з низькою теплопровідністю (менше $1.0 \text{ Вт/м}^*\text{К}$). Відрізняються вони потужністю використовуваних термісторів.

В таблиці Г.2 Додатку Г приведено значення розбалансування вимірювального мосту на виході АЦП через кожні 0,15 секунд впродовж імпульсу розігріву. Таким чином, виміряні числові значення для кожного із зондів представляють собою термограми розігріву термістора.

На тепловий контакт зонду і досліджуваного матеріалу впливають такі фактори як шорсткість дослідного матеріалу та нерівність його поверхні. За допомогою експериментальної установки проведено вимірювання температури розігріву термісторів трьох зондів протягом 6 секунд, використовуючи в якості досліджуваних матеріалів пластину ПВХ товщиною 8 мм (рис. 5.12), пластину вакуумної гуми товщиною 6 мм (рис. 5.13) та латунну пластину товщиною 8 мм (рис. 5.14). На рис. 5.15 приведено діаграму розподілу температури розігріву термісторів 3-х вимірювальних зондів для пластини з вакуумної резини ($\lambda = 0,175 \text{ Вт/м}^*\text{К}$), пластини латуні ($\lambda = 100 \text{ Вт/м}^*\text{К}$) та пластини ПВХ ($\lambda = 0,159 \text{ Вт/м}^*\text{К}$). На діаграмі приведено дані розігріву протягом двох сеансів вимірювання по кожному з матеріалів.

Результати цих вимірювань [106] показують, що термограми зондів при дослідженні матеріалів, що мають малу теплопровідність, майже співпадають. А при зростанні теплопровідності матеріалу вплив якості теплового контакту збільшується і термограми розходяться (у випадках з досліджуваними матеріалами: вакуумною гумою та латунню – рис. 5.13 та рис. 5.14). Таким чином з виміряних термограм (рис. 5.12, рис. 5.13, рис. 5.14) можна зробити висновок, що деякі з зондів можуть мати неякісний тепловий контакт з досліджуваним матеріалом (рис. 5.13 Зонд №3 та рис. 5.14 Зонд №1), внаслідок чого цей зонд прогрівається значно більше, ніж інші (позначено на діаграмі рис. 5.15 стрілками).

Похибка вимірювання визначалась згідно з ДСТУ ГОСТ 8.207.2008 [129] в залежності від кількості виміряних значень. Для зменшення похибки вимірювань тут застосовано алгоритм обробки результатів досліджень оснований на

попарному порівнянні середніх значень температури розігріву кількох термісторів.

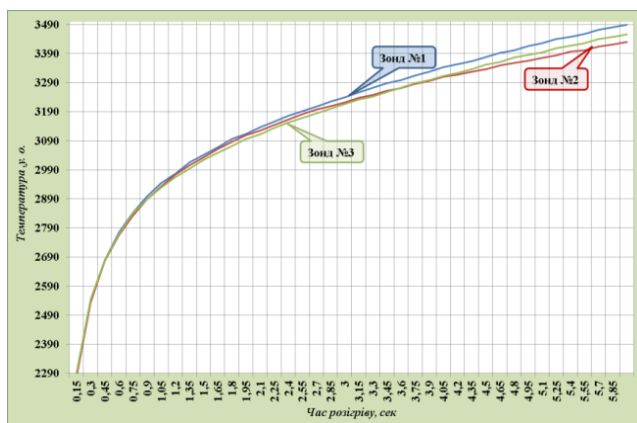


Рис. 5.12. Термограма розігріву термісторів при дослідженні ТФХ пластини ПВХ.

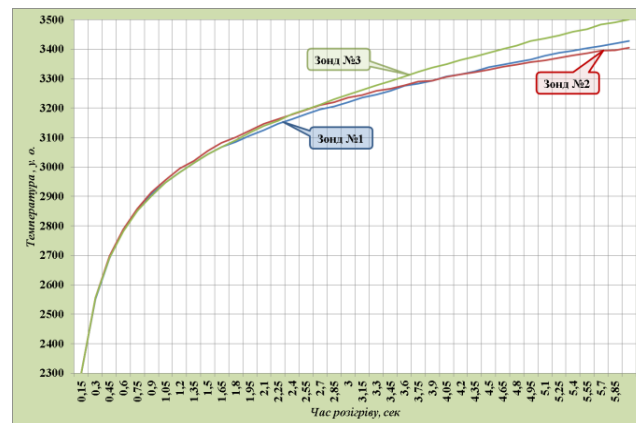


Рис. 5.13. Термограма розігріву термісторів при дослідженні ТФХ вакуумної гуми.

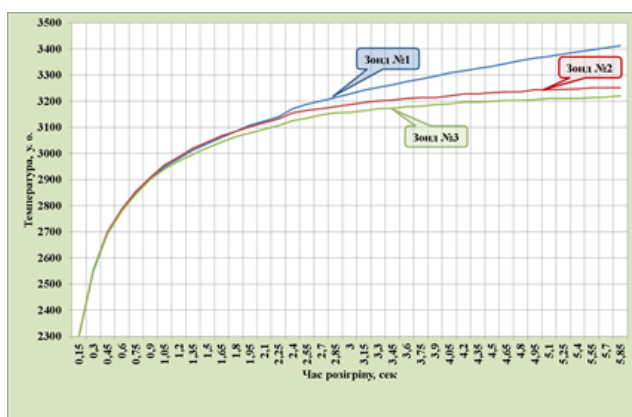


Рис. 5.14. Термограма розігріву термісторів при дослідженні ТФХ пластини з латуні.

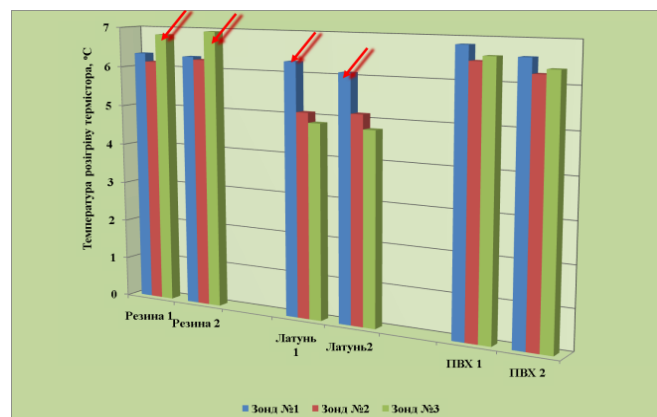


Рис. 5.15. Діаграма розподілу температури розігріву термісторів 3-х вимірювальних зондів пластини вакуумної гуми, пластини латуні та пластини ПВХ.

При порівнянні визначається ступінь відхилення середнього значення температури розігріву термістора кожного із зондів порівняно з іншими двома і при значному відхиленні виміряні значення вилучаються за t -критерієм Ст'юдента з подальших розрахунків. Якщо ж похибка при вимірюванні не перевищує середньостатистичного значення похибки вимірювання, при розрахунках ТФХ застосовується середнє значення температури розігріву всіх

термісторних зондів. Такі методи значно зменшує випадкову складову похибки вимірювання.

Рекомендовані теплові характеристики матеріалів вимірювального зонду, електричні характеристики вимірювального зонду та методи вимірювання і обчислення коефіцієнта теплопровідності досліджуваних матеріалів представлено в таблиці Г.3 Додатку Г.

Таким чином, метод прямого підігріву термістора може використовуватися для вимірювання ТФХ твердих матеріалів, а також:

- вимірювання залежності коефіцієнта теплопровідності від температури досліджуваних матеріалів;
- визначення складу матеріалу досліджуваного зразка;
- визначення вологості матеріалів;
- знаходження внутрішніх дефектів матеріалів (пор, тріщин).

Висновки до розділу

1. Представлено експериментальну установку для вимірювання ТФХ твердих матеріалів та наведено результати досліджень вимірювання ТФХ твердих матеріалів, що підтвердило можливість застосування вдосконаленого методу контролю складу речовин за допомогою розробленої експериментальної установки для визначення теплопровідності твердих матеріалів з використанням методу прямого підігріву термістора.

2. Наведено результати вимірювання приладом коефіцієнтів теплопровідності різноманітних речовин в діапазоні від 0,15 Вт/м*К до 0,7 Вт/м*К, які підтверджують можливість використання методу прямого підігріву термістора для вимірювання теплопровідності твердих, умовно твердих та сипучих речовин.

3. Запропонований спосіб визначення наявності та ступеню імунологічної реакції для розчинів біологічних проб полягає в порівнянні значень математичного очікування коефіцієнтів теплопровідності, коефіцієнта асиметрії розподілення значень та середнього статистичного відхилення, що одержаних в

результаті аналізу даних контрольних вимірювань та значень даних вимірювання з поправкою на зміну значення математичного очікування коефіцієнтів теплопровідності, викликану властивостями конкретної біологічної проби.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

В результаті виконання дисертаційних досліджень отримано нове вирішення актуальної науково-технічної задачі, що полягає у вдосконаленні методу контролю складу речовин шляхом визначення їх теплопровідності та створенні засобу з підвищеними показниками точності, продуктивності та розширеними функціональними можливостями, що їх реалізує. Отримано такі основні результати:

1. Аналіз сучасного стану контролю та визначення складу речовин показав, що існуючі методи не в повній мірі враховують всі складові процесу теплообміну при визначенні теплофізичних характеристик, які є одними з основних при визначенні властивостей речовин. Тоді як існуючі прилади не забезпечують одночасне вимірювання багатьох досліджуваних зразків, що часто унеможливорює відтворення та отримання достовірних результатів досліджень. Запропоновано вирішити поставлені задачі за допомогою методу прямого розігріву термістора.

2. Вдосконалено метод контролю складу речовин при визначенні їх теплопровідності на основі використання покращеної математичної моделі та вимірної величини саморозігріву термістора у методі його прямого підігріву, що дозволило підвищити інформаційну чутливість методу до зміни компонентного складу речовини.

3. Створено математичну модель, яка описує процес визначення теплопровідності та враховує умови розповсюдження теплової енергії від чутливого елемента, що покритий захисною оболонкою, і дала змогу:

– вперше запропонувати способи підвищення точності вимірювання теплопровідності речовин шляхом введення корегуючих коефіцієнтів за

одночасного вимірювання в однакових умовах великої кількості зразків мінімального об'єму;

– вперше запропоновано спосіб визначення наявності та ступеню імунологічної реакції за відхиленням абсолютних значень теплопровідності суміші крові з алергеном від накопичених середньостатистичних даних.

4. Створено дослідний зразок багатоканального приладу для вимірювання коефіцієнта теплопровідності речовин з похибкою, що не перевищує 3% та загальним часом вимірювання не більше 20 хвилин, що дозволило розробити й обґрунтувати шляхи зниження похибки вимірювання та зменшити час проведення досліджень. На створений прилад отримано патент України на винахід за №113044 від 25.11.2016.

5. Створено алгоритмічне та програмне забезпечення системи обробки результатів дослідження для розробленого багатоканального приладу, що дозволяє здійснювати одночасне визначення теплопровідності великої кількості досліджуваних зразків.

6. В результаті проведених досліджень з використанням еталонних речовин з відомими ТФХ встановлено числові значення корегуючих коефіцієнтів. Представлено результати вимірювання теплопровідності досліджуваних речовин в діапазоні від 0,1 Вт/м*К до 1,0 Вт/м*К з врахуванням корегуючих коефіцієнтів, що підтвердило можливість використання вдосконаленого методу та розробленого приладу для визначення та контролю складу досліджуваних речовин.

7. На основі проведених експериментальних досліджень з використанням багатоканального приладу обґрунтовано шляхи зменшення загальної похибки вимірювання коефіцієнта теплопровідності досліджуваних речовин і розроблено алгоритмічні, схемо-технічні та конструктивно-технологічні рекомендації щодо їх реалізації. Виконано аналіз дестабілізуючих факторів та причин їх виникнення, що впливають на похибку вимірювання, і впроваджено засоби зниження похибки вимірювання теплопровідності до 1,5%. Шляхом проведення комплексу сеансів вимірювання теплопровідності речовин та їх порівняння з відомими

досліджуваними речовинами встановлено, що запропонована математична модель визначення коефіцієнта теплопровідності є адекватною за критерієм Фішера з довірчою ймовірністю 0,95.

8. Виконана апробація вдосконаленого методу визначення і контролю складу речовин шляхом вимірювання їх теплопровідності з застосуванням вдосконаленого

методу прямого підігріву термістора та розробленого приладу:

– в біології та медицині при дослідженні імунологічної реакції пацієнтів на найпоширеніші алергени, що підтвердила можливість застосування даного методу для виявлення ступеню імунологічної реакції біологічних проб;

– для вимірювання ТФХ матеріалів, наведено результати відповідних досліджень, що підтвердило можливість їх застосування при визначенні складу та контролю твердих матеріалів за допомогою експериментальної установки.

Результати дисертаційної роботи пройшли досліdну перевірку та впроваджено в виробництво ТОВ «ВІРКОМ», ПП «УКРТЕХМЕД» та в навчальний процес кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дивин А. Г., Пономарев С. В. Методы и средства измерения состава и свойств веществ. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: в 5 ч. / А. Г. Дивин, С. В. Пономарев. Тамбов, Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. Ч. 4. С. 3-7
2. Basu S., Miglani A. Combustion and heat transfer characteristics of nanofluid fuel droplets: A short review. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2016. Vol. 96. P. 482–503.
3. Leontiev A. I., Kavtaradze R. Z., Onishchenko D. O., Golosov A. S., Pankratov S. A. Improvement of piston engine operation efficiency by direct conversion of the heat of exhaust gases into electric energy. *High Temp*. 2016. Vol. 54, No. 1. P.105–112.
4. Nakoryakov V. E., Mezentsev I. V., Meleshkin A. V., Elistratov D. S., Manakov A. Yu. Experimental investigation of gas-hydrate formation by underwater boiling of a condensed gas layer. *J. Eng. Thermophys*. 2015. Vol. 24, No. 4. P. 335–337.
5. Rutin S. B., Skripov P. V. Investigation of not fully stable fluids by the method of controlled pulse heating. 1. Experimental approach. *Thermochim. Acta*. 2013. Vol. 562. P. 70–74.
6. Шмельков Д. А., Нигматуллин Р. Г., Шустер Л. Ш. Устройство для определения относительной вязкости нефтепродуктов и показателя динамики их нагрева. *Вестник УГАТУ:Машиностроение*. 2012. Вып.53, №8. С. 126-128.
7. Баурова Н. И., Зорин В. А. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учебное пособие. Москва: МАДИ, 2016. 264 с.
8. Старостин А. А., Горбатов В. И., Смотрицкий А. А., Ямпольский А. Д., Скрипов П.В. Применение локального импульсного нагрева для контроля свойств материалов. Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ: материалы 2й международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 28-30 ноября 2012 г.) Санкт-Петербург: ИТМО, 2012. С. 74.

9. Dutra Brionizio J., de Faro Orlando Al., Bonnier G. Characterization of a spherical heat source for measuring thermal conductivity and water content of ethanol and water mixtures. *Int. J. Metrol. Qual. Eng.* 2017. Vol. 8, No. 18. P. 1-13.

10. Коротких А. Г. Теплопроводность материалов: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 97 с.

11. Григорьев В. А., Зорин В. М. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник / Под общ. ред. чл.-корр. АН СССР В. А. Григорьева, В. М. Зорина. 2-е изд., перераб. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 560 с. (Серия «Теплоэнергетика и теплотехника». Кн. 2).

12. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача : учебник для теплоэнерг. спец. вузов. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоиздат, 1981. 417 с.

13. Предводителей А. С. О некоторых инвариантных количествах в теории теплопроводности и вязкости жидкостей . *С-ЖФХ*. 1948. Т. XXII, Вып. 3. С. 339-348.

14. Варгафтик Н. Б., Филиппов Л. П., Тарзиманов А. А., Тоцкий Е. Е. Справочник по теплопроводности газов и жидкостей. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.

15. Филиппов В. И. Применение методов регулярного теплового режима для определения теплофизических характеристик пищевых продуктов. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. Санкт-Петербург, 2015. № 3. С. 22-30.

16. Куцакова В. Е., Фролов С. В., Филиппов В. И., Данин В. Б. Холодильная технология пищевых продуктов: учебник для вузов. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2007. 224 с.

17. Пристрій для реєстрації алергічних реакцій: пат. 7178 А Україна, МПК (2006):А 61В 10/00. № 94011978; заявл. 31.03.1994 ; опубл. 30.06.1995, Бюл. № 2. 4 с.

18. Пристрій для реєстрації процесів у біологічних пробах: деклараційний пат. 63844 А Україна, МПК (2006): А61 В 5/00. № 2003098744; заявл. 25.09.2003; опубл. 15.01.2004, Бюл. № 1. 2 с.

19. Спосіб діагностики харчового несприйняття: патент на корисну модель 58440 Україна, МПК (2011.01): А 61В 5/00. № u201011843; заявл. 06.10.2010; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7. 4 с.

20. Кавун Э. Н. Иммунотермисторная установка. *Медтехника*. 1979. №4. С. 34 - 35.

21. Способ исследования реакции агглютинации: пат. 730349 СРСР МПК А 61 В 10/00. № 2668895/28-13; заявл. 04.07.1978 ; опубл. 30.04.1980, Бюл. № 16. 4 с.

22. Система для анализа иммунологических реакций: пат. 1257521 СРСР МПК: G01N 33/53. № 3661389/28-14; заявл. 12.07.1983 ; опубл. 15.09.1986, Бюл. № 34. 3 с.

23. Шимчук Н. А. Влияние различных факторов на теплопроводность нанофлюидов. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. № 72. С. 35 40

24. Шимчук Н. А. Экспериментально-расчетное исследование теплофизических характеристик нанофлюидов: дисс. ... канд. техн. наук. Одесса, 2017. 219 с.

25. Геллер В. З., Шимчук Н. А., Губанов С. Н. Свойства переноса нанофлюидов (эксперимент и методы расчёта). *Холодильна техніка та технологія. Холодильні та супутні технології*. 2015. Т. 51. Вип. 6. С. 72 - 77.

26. Жаров А. В., Савинский Н. Г., Павлов А. А., Евдокимов А. Н. Экспериментальный метод измерения теплопроводности наножидкости. *Фундаментальные исследования*. 2014. № 8, Ч. 6. С. 1345 – 1350.

27. Choi S. U. S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *ASME FED*. 1995. Vol. 231. P. 99–105.

28. Choi S. U. S., Zhang Z., Yu W., Lockwood F. E. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. *Applied Physics Letters*. 2001. Vol. 79, No. 14. P. 2252 – 2254.

29. Das S., Choi S. U. S., Patel H. Heat transfer in nanofluids. A review. *Heat Transfer Engineering*. 2006. Vol. 27. P. 3 – 19.
30. Das S. K. Nanofluids - the cooling medium of the future. *Heat Transfer Engineering*. 2006. Vol. 27. P.1 - 2.
31. Earle M., Seddon K. Ionic liquids. Green solvents for the future. *Pure and Applied Chemistry*. 2000. Vol. 72. P. 1391 - 1398.
32. Шангин В. В. Импульсное тепловое тестирование жидкости как метод обнаружения летучих примесей в маслах энергетического оборудования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2014. 24 с.
33. ГОСТ 25314-82. Контроль неразрушающий тепловой. Термины и определения. [Действующий 2009-01-01]. Офиц. изд. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2005. 8 с.
34. ГОСТ 23483-79. Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования. [Действующий от 1980-01-01]. Офиц. изд. Москва: Издательство стандартов, 1985. 14 с.
35. Цедерберг Н. В. Теплопроводность газов и жидкостей. Москва: Госэнергоиздат, 1963. 470 с.
36. Шашков А. Г., Волохов Г. М., Абраменко Т. Н., Козлов В. П. Методы определения теплопроводности и температуропроводности. Москва: Энергия, 1973. 336 с.
37. Агапкин В. М., Кривошеин Б. Л., Юфин В. А. Тепловой и гидравлический расчеты трубопроводов для нефти и нефтепродуктов. Москва: Недра. 1981. 256 с.
38. Любимова Д. А., Пономарев С. В., Дивин А. Г. Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом регулярного режима третьего рода: монография / под науч. ред. С. В. Пономарева. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. 80 с.
39. Липаев А. А. Применение метода периодического нагрева в экспериментальной теплофизике. Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-

Петербург, 30 ноября – 2 декабря 2010 г.). Санкт-Петербург: СПбГУНиПТ, 2010. С. 182 – 195.

40. Angstrom A. J. Neue Methode das Warmeleitungs-vermogen der Korper zu bestimmen. *Ann. d. Physik*. 1961. Bd. 14. S. 513.

41. Филиппов Л. П. Измерения теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева. Москва: Энергоатомизд, 1984. 104 с.

42. Ивлиев А. Д. Применение метода температурных волн для исследования теплофизических свойств конденсированных веществ. Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 30 ноября – 2 декабря 2010 г.). Санкт-Петербург : СПбГУНиПТ, 2010. С. 65 – 75.

43. Кислицин А. А. Основы теплофизики: лекции и семинары. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2002. 152 с.

44. Gonzalez-Mendizabal D.P., Bortot D. P., Lopez de Ramos A. L. A thermal conductivity experimental method based on the Peltier effect. *International Journal of Thermophysics*. 1998. Vol. 19, № 4. P. 1229 – 1238.

45. Сайт ЗАО "Спектроскопические системы": Метод лазерной вспышки [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: <http://www.spectrosystems.ru/methods/laserflash.shtml> (дата звернения 15.01.2017). – Назва з екрану.

46. Kharalkar N. M., Hayes L. J., Valvano J. W. Pulse-power integrated-decay technique for the measurement of thermal conductivity. *Measurement Science and Technology*. 2008. Vol.19, No. 7. P. 1 - 10.

47. Kharalkar N. M., Bauserman S. C., Valvano J. W. Effect of formalin fixation on thermal conductivity of the biological tissue. *Journal of Biomechanical Engineering*. 2009. Vol. 131, No. 7. P. 074508 - 1 - 4.

48. Anderson G. T., Valvano J. W., Santos R. R. Self-heated thermistor measurements of perfusion. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1992. Vol. 39. P. 877 - 885.

49. Anderson G. T., Valvano J. W. An interlobular artery and vein based model for self-heated thermistor measurements of perfusion in canine kidneys. *ASME Winter Annual Meeting*. 1989. HTD Vol. 126, BED Vol. 12. P. 29 - 35.
50. Arkin H., Holmes K. R., Chen M. M., Bottje W. G. Thermal pulse decay method for simultaneous measurement of local thermal conductivity and blood perfusion: a theoretical analysis. *J. of Biomechanical Engineering*. 1986. Vol. 108. P. 208 - 214.
51. Van Gelder M. F. A thermistor based method for measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of moist food materials at high temperatures: Ph.D. dissertation. Blacksburg, Virginia, 1998.
52. Atkins R. T., Wright E. A. A thermistor - based thermal conductivity measurement system. *U.S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Special Report 90-24*. 1990. Vol. 90-24. P. 1-11.
53. Chato J. C. A method for the measurement of the thermal properties of biological materials. In "Thermal Problems in Biotechnology". NY: ASME, 1968. P. 16 - 25.
54. Balasubramaniam T. A., Bowman H. F. Temperature field due to a time dependent heat source of spherical geometry in a infinite medium. *Journal of Heat Transfer*. 1974. Vol. 99, No. 3. P. 296 - 299.
55. Balasubramaniam T. A. Thermal conductivity and thermal diffusivity of biomaterials: a simultaneous measurement technique: Ph.D. dissertation. Boston, MA, 1975.
56. Balasubramaniam T. A., Bowman H. F. Thermal conductivity and thermal diffusivity of biomaterials: A simultaneous measurement technique. *J. Biomech. Eng.* 1977. No. 90. P. 148 – 154.
57. Bowman H. F., Balasubramaniam T.A. A new technique utilizing thermistor probes for the measurement of thermal properties of biomaterials. *Cryobiology*. 1976. Vol. 13. P. 572 – 580.
58. Valvano J. W. The use of thermal diffusivity to quantify tissue perfusion: Ph.D. thesis. Cambridge, MA, 1981.

59. Valvano J. W., Allen J. T., Bowman H. F. The simultaneous measurement of thermal conductivity and perfusion in small volumes of tissue. *Journal of Biomechanical Engineering*. 1984. Vol. 106. P. 192 - 197.

60. Valvano J. W., Cochran J. R., Diller K. R. Thermal conductivity and diffusivity of biomaterials measured with self-heated thermistors. *Int. Journal of Thermophysics*. 1985. Vol. 6. P. 301 - 311.

61. Woodbury K. A. An experimental and analytical investigation of liquid moisture distribution in roof insulating systems: Ph.D. thesis. Blacksburg, Virginia, 1984.

62. ДСТУ Б В.2.7-105-2000 (ГОСТ 7076-99). Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності і термічного опору при стаціонарному тепловому режимі. [Чинний від 2001-07-01]. Вид. офіц. Київ: Укрархбудінформ, 2001. 26 с.

63. ДСТУ Б В.2.7-40-95 (ГОСТ 30256-94). Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності циліндричним зондом. [Чинний від 1996-04-01]. Вид. офіц. Київ: Укрархбудінформ, 1996. 23 с.

64. Сайт ООО «ЛМТ»: Теплофизические измерительные приборы: Комплекс приборов для измерения тепловых и влажностных свойств [Електронний ресурс] / Електрон. дан., 2017. URL: <http://lmt.ifmo.ru/index.php/production/thermalinstruments> (дата звернення 03.04.2017). – Назва з екрану.

65. Симанков Д. С. Прибор «режим - 1» для измерения теплофизических свойств различных веществ и материалов [Електронний ресурс] / Електрон. дан., 2017. URL: <http://www.scienceforum.ru/2013/pdf/8685.pdf> (дата звернення 05.04.2017). – Назва з екрану.

66. Сайт «Decagon Devices, Inc.»: The KD2 Pro Thermal Properties Analyzer [Електронний ресурс] / Електрон. дан., 2017. URL: <https://www.decagon.com/en/thermal/instruments/kd2-pro/> (дата звернення 05.04.2017). – Назва з екрану.

67. Сайт «INTERTECH-corporation»: Анализатор теплопроводности DTC-25. TA Instruments [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: <http://www.intertech-corp.ru/aboutproduct.asp?gr=17&subgr=88&prid=215> (дата звернения 05.04.2017). – Назва з екрану.

68. Сайт «INTERTECH-corporation»: Анализатор теплопроводности DTC-300. TA Instruments [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: <http://www.intertech-corp.ru/aboutproduct.asp?gr=17&subgr=88&prid=216> (дата звернения 07.04.2017). – Назва з екрану.

69. Сайт «PSL-Systemtechnik GmbH»: Измерение теплопроводности жидкостей с помощью Lambda Measuring System [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: http://www.psl-systemtechnik.de/thermal_conductivity.html?&L=3 (дата звернения 07.04.2017). – Назва з екрану.

70. Сайт «Hot Disk AB»: Hot Disk TPS 2200: Economical Standardised Thermal Constants Analyser [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: <http://www.hotdiskinstruments.com/products/instruments-for-thermal-conductivity-measurements/tps-2200.html> (дата звернения 10.04.2017). – Назва з екрану.

71. Сайт «C-Therm Technologies Ltd.»: TCI thermal conductivity analyzer [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: http://ctherm.com/products/tci_thermal_conductivity/specifications/ (дата звернения 10.04.2017). – Назва з екрану.

72. Сайт «Linseis Messgeraete GmbH»: XFA 300/600 Xenon Flash Apparatus (Thermal Conductivity / Diffusivity) [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: <http://linseis.webseiten.cc/en/our-products/thermal-diffusivity-thermal-conductivity/xf-300600-xenonflash/> (дата звернения 10.04.2017). – Назва з екрану.

73. Сайт «The NETZSCH Group»: LFA 467 HyperFlash® – Light Flash Apparatus. New Dimensions in the Measurement of Thermal Diffusivity and Conductivity – Fast, Simple, Economical [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions/thermal->

[diffusivity-conductivity/lfa-467-hyperflash/](#) (дата звернення 11.04.2017). – Назва з екрану.

74. Сайт «TM FLASHLINE»: FLASHLINE 5000 THERMAL PROPERTIES SYSTEM [Електронний ресурс] / Електрон. дан., 2017. URL: <http://download.5117.com/data/file/1586.pdf> (дата звернення 11.04.2017). – Назва з екрану.

75. Сайт «Thermtest Inc»: LIQUID THERMAL CONDUCTIVITY METER THW-L1 [Електронний ресурс] / Електрон. дан., 2017. URL: <https://www.thermtest.com/uploads/files/pdfs/THW-L1.pdf> (дата звернення 12.04.2017). – Назва з екрану.

76. Сайт «Thermtest Inc»: Thermal Conductivity / Thermal Resistivity Meter TLS 100 [Електронний ресурс] / Електрон. дан., 2017. URL: <https://www.thermtest.com/uploads/files/pdfs/TLS-100.pdf> (дата звернення 12.04.2017). – Назва з екрану.

77. Сайт «Linseis Messgeraete GmbH»: THB - Transient Hot Bridge – аналізатор теплопровідності [Електронний ресурс] / Електрон. дан., 2017. URL: <http://www.linseis.com/ru/pribory/temperaturoprovodnost-i-teploprovodnost/thb-transient-hot-bridge/> (дата звернення 12.04.2017). – Назва з екрану.

78. Xie H. Q., Gu H., Fujii M., Zhang X. Short hot wire technique for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of various materials. *Measurement Science and Technology*. 2006. Vol. 17, Iss. 1. P. 208 – 214. doi: 10.1088/0957- 0233/17/1/032.

79. Mintsu H. A. , Roy G., Nguyen C. T., Doucet D. New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*. 2009. Vol. 48, Iss. 2. P. 363 – 371. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2008.03.009.

80. Steinhart J. S., Hart S. R. Calibration curves for thermistors. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1968. Vol. 15, Iss. 4. P. 497 - 503

81. Kravets R.R. Determination of thermal conductivity of food materials using a bead thermistor. Ph.D. thesis. Blacksburg, Virginia, 1988.

82. Kharalkar N. M., Valvano J. W. Finite element analysis and experimental verification of multilayered tissue characterization using the thermal technique. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2006. Vol. 1. P. 3182 - 3185.

83. Матвієнко С. М., Філіппова М. В., Мартинчук О. А. Дослідження теплопровідності матеріалів за допомогою методу імпульсної термістOMETрії. Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського. 2015. Вип.6, №95. С. 106 - 112.

84. Матвиенко С. Н., Филиппова М. В. К вопросу разработки системы измерения теплопроводности методом импульсной термистометрии. Приборостроение – 2014: материалы VII Международной научно-технической конференции (г.Минск, 19 - 21 ноября 2014). Минск: БНТУ, 2014. С. 110 - 111.

85. Акуленко Д. В., Агапов А. Н., Проценко И. Г. Измерение коэффициента теплопроводности среды с использованием термистора прямого подогрева. *Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития: сб. научных статей молодых ученых, аспирантов и студентов ФГБОУ ВПО "ТГТУ".* 2012. Вып. III. С.49 – 52.

86. Kubičár Ľ., Bágel Ľ., Vretenár V., Štofanič V. Validation test of the Hot Ball method for setting of the cement paste. Meeting of the Thermophysics Working Group of the Slovak Physical Society «THERMOPHYSICS – 2005» (Kočovce, 12-13 October 2005). Kočovce, 2005. P. 38 - 42.

87. Матвиенко С. Н., Выслоух С. П. Возможность определения теплофизических свойств жидкостей и материалов методом термистометрии. Новые направления развития приборостроения: сборник тезисов докладов 9-й Международной научно-техн. конф. молодых ученых и студентов (г. Минск, 20-21 апреля 2016 г.). Минск: БНТУ, 2016. С. 117.

88. Матвиенко С. Н., Выслоух С. П. Исследование методов измерения теплопроводности с использованием термисторов. Новые направления развития приборостроения: сборник тезисов докладов 8-й Международной научно-техн. конф. молодых ученых и студентов (г. Минск, 22-24 апреля 2015 г.). Минск: БНТУ, 2015. С. 285.

89. Матвієнко С. М., Вислоух С. П. Вимірювання коефіцієнта теплопровідності нанорідин методом прямого підігріву термістора. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 16-ї Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 16-17 травня 2017 р.). Київ: НТТУ «КПІ», 2017. С. 62 – 63.

90. Tymchik G., Vysloukh S., Tereshchenko N., Matvienko S. Investigation thermal conductivity of biological materials by direct heating hermistor method. 2018 IEEE 38th International Conference on ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY (ELNANO) (Kyiv, 24.04.2018). Kyiv, 2018. P. (Scopus) сторінки?????.

91. Тимчик Г. С., Вислоух С. П., Матвієнко С. М. Контроль складу речовин за допомогою «методу теплопровідності». *Перспективні технології та прилади*. 2018. № 12. С. 157 – 163.

92. Зотов В. Принципы построения систем температурного контроля на NTC-термисторах компании Epcos. *Компоненты и технологии*. 2007. № 6. С. 32 - 38.

93. Сайт «europe.electrocomponents.com»: General Technical Information for NTC Thermistors, EPCOS [Електронний ресурс] / Електрон. дан., 2017. URL: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/01d5/0900766b801d5c00.pdf> (дата звернення 26.07.2017). – Назва з екрану.

94. Сайт «Mouser Electronics»: General Technical Information, EPCOS AG 2002. Reproduction, publication and dissemination of this brochure and the information contained therein without EPCOS' prior express consent is prohibited [Електронний ресурс] / Електрон. дан., 2017. URL: <http://www.mouser.com/ds/2/136/B3574-50177.pdf> (дата звернення 26.07.2017). – Назва з екрану.

95. Пристрій та спосіб реєстрації теплових процесів у біологічних пробах: пат. 113044 Україна, А61В 5/05 (2006.01), G01N 33/487 (2006.01), G01N 33/53 (2006.01), G01N 25/18 (2006.01), G01K 7/22 (2006.01).; заявл 04.04.2016; опубл. 25.11.2016, Бюл.№ 22. 9 с.

96. Информационный портал «Temperatures.ru»: Термисторы [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: <http://temperatures.ru/pages/termistory> (дата звернения 06.08.2017). – Назва з екрану.

97. Сайт «EPCOS AG»: NTC thermistors for temperature measurement. Glass-encapsulated sensors, standard type [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: http://en.tdk.eu/inf/50/db/ntc_13/NTC_Glass_enc_sensors_G1550.pdf (дата звернения 06.08.2017). – Назва з екрану.

98. Сайт «Mitsubishi Materials Corp»: Thermistors [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: <http://www.mmc.co.jp/adv/dev/english/contents/thermistor/index.html> (дата звернения 06.08.2017). – Назва з екрану.

99. Сайт «EPCOS AG»: NTC Thermistors. Glass-encapsulated NTC Sensor Elements [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: http://ferrite.ru/uploads/pdf/products/passive/Thermistors/NTC_Glass_enc_sensors_all.pdf (дата звернения 07.08.2017). – Назва з екрану.

100. Сайт «Mitsubishi Materials Corp»: Thermistors [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: <http://www.mmc.co.jp/adv/dev/english/techtools/index.html> (дата звернения 07.08.2017). – Назва з екрану.

101. Matvienko S., Vysloukh S., Martynchyk O. Determination thermal and physical characteristics of liquids using pulse heating thermistor method. *International Journal of Engineering Research and Science*. 2016. Vol.2, Iss. 5. P.250 - 258. ISSN № 2395 - 6992.

102. Matvienko S., Vysloukh S., Martynchyk O. Increasing accuracy of measuring thermal conductivity of liquids by using the direct heating thermistor method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 4, No.5(82). P. 20 - 30. DOI : 10.15587/1729-4061.2016.75459.

103. Подледнева Н. А., Краснов В. А., Магомадов Р. С. Определение коэффициентов теплопроводности и температуропроводности за один опыт

методом линейного источника теплоты постоянной мощности. *Вестник АГТУ*. – 2013. № 2. С.50 - 55. ISSN 1812-9498

104. Матвієнко С. М., Тимчик Г. С., Терещенко М. Ф., Матвієнко А. М. Вплив процесів конвекції в рідині на похибку вимірювання теплопровідності методом прямого підігріву термістора. *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. 2017. № 5. С. 110 – 122.

105. Матвієнко С. М., Вислоух С. П. Підвищення точності вимірювання теплопровідності рідин методом прямого підігріву термістора. *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. 2016. № 6. С. 85 – 93.

106. Матвієнко С. М., Вислоух С. П., Філоненко К. Г. Вимірювання теплопровідності твердих матеріалів методом прямого підігріву термістора. *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. 2017. № 2. С. 97 – 107.

107. Матвієнко С.М., Філіппова М.В. Експериментальна установка для вимірювання теплопровідності. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 14-ї Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 22-23 квітня 2015 р.). Київ: НТТУ «КПІ», 2015. С. 78-79.

108. Матвиенко С.Н., Филиппова М.В. Вимірювання теплопровідності рідин та матеріалів методом імпульсного підігріву термістора. Погляд у майбутнє приладобудування: збірник тез доповідей VII науково-практичної конференції студентів та аспірантів (м. Київ, дата 2015 р.). Київ: НТУУ «КПІ», 2015. С. 52.

109. Матвиенко С. Н., Выслоух С. П. Оптимизация процесса измерения теплопроводности методом импульсного подогрева термистора. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 15-ї Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 17-18 травня 2016р.). Київ: НТТУ «КПІ», 2016. С. 65.

110. Матвиенко С. Н., Выслоух С. П. Конструктивные особенности экспериментальной установки для измерения теплопроводности крови. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 15-ї Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 17-18 травня 2016р.). Київ: НТТУ «КПІ», 2016. С. 122 - 123.

111. Матвиенко С. Н., Выслоух С. П. Программный комплекс обработки результатов исследований измерения теплопроводности жидкостей и материалов методом термистометрии. Информатика, Математика, Автоматика. ІМА: 2016: матеріали науково-технічної конференції (м. Суми, 18–22 квітня 2016 р.). Суми. 2016. С. 206.

112. Сайт «ООО АГ "Аналитэксперт"»: Шейкеры термостатируемые, шейкер-инкубаторы [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: <http://analytexpert.ru/catalog/termo/termostatiruyushchie-sheykery/> (дата звернення 16.08.2017). – Назва з екрану.

113. High-Tech Laboratory Equipment Supply Manufacturer [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: <http://www.axyos.com/Axyos.htm> (дата звернення 16.08.2017). – Назва з екрану.

114. Шашков А. Г. Золотухина А. Ф., Василенко В. Б. Фактор термодиффузии газовых смесей: методы определения / под ред. С. А. Жданка. Минск: Белорусская наука, 2007. 238 с. ISBN 978-985-08-0878-3

115. Гинсбург А. С., Громов М. А., Красовская Г. И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: справочник. Москва: Пищевая промышленность, 1980. 288 с.

116. Селиванова З. М. Интеллектуализация информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов: монографія. Москва: Машиностроение-1, 2006. 184 с.

117. Селиванова З. М. Интеллектуализация информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Тамбов, 2006. 402 с.

118. Пономарев С. В., Дивин А. Г., Балабанов П. В. Рекомендации по разработке методики введения поправок на систематические погрешности измерений теплофизических свойств веществ. *Метрология*. 2013. № 10. С. 38 – 47.

119. Управление качеством продукции. Инструменты и методы менеджмента качества : учебное пособие / С. В. Пономарев и др.; Москва : РИА «Стандарты и качество», 2005. 248 с.

120. Управление качеством процессов и продукции. Кн. 2: Инструменты и методы менеджмента качества процессов в производственной, коммерческой и образовательной сферах : учебное пособие / С. В. Пономарев и др.; под ред. д-ра техн. наук. проф. С. В. Пономарева. Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 212 с.

121. Мищенко С. В. Аль-Бусаиди С. С. С., Соседов Г. А., Савин К. Н., Шямякина И. Н., Дивина Д. А., Пономарев С. В. Использование методологии решения проблем, инструментов и методов менеджмента качества при выполнении научных исследований. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2012. № 1. С. 6 – 18.

122. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення. [Чинний від 1995-01-01]. Вид.офіц . Київ : Держстандарт України, 1994 . 68 с.

123. Варфоломеев Б. Г., Грошев В. Н., Селиванова З. М. Оценка погрешности определения теплофизических характеристик материалов, обусловленной контактным термосопротивлением. Теплофизические проблемы промышленного производства : краткие тез. докл. междунар.совещ.- семинара молодых ученых. Тамбов: Тамб. ин-т хим. машиностр. 1992. С. 53.

124. Иванова Г. М., Кузнецов Н. Д., Чистяков В. С. Теплотехнические измерения и приборы. Москва: Издательство МЭИ, 2005. 460 с.

125. Гуров А. В., Пономарев С. В. Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты : монография / под науч. ред. С. В. Пономарева. Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. 100 с.

126. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / С. В. Пономарев и др.; под ред. С. В. Пономарева. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 408 с.

127. Григорьев А.С., Муромцев Ю. Л., Селиванова З. М. Комплексное определение теплофизических свойств и влажности твёрдых материалов. Теплофизика релаксирующих систем: краткие тез. докл. междунар. совещ.-семинара молодых ученых Всесоюзн. совещ. Тамбов: Тамб. ин-т хим. машиностр., 1990. С. 106

128. Классификация помех [Электронный ресурс] / Электрон. дан., 2017. URL: <http://ks-invest.ru/metrology/gl-60.html> (дата звернення 21.08.2017). – Назва з екрану.

129. ДСТУ ГОСТ 8.207:2008. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Прямі вимірювання з багаторазовими спостереженнями. Методи обробки результатів спостережень. Основні положення. [Чинний від 2008-01-10]. Вид.офіц. Київ : Держстандарт України, 2008. 7 с.

130. Матвієнко С. М., Матвієнко А. М. Вимірювання коефіцієнта теплопровідності крові пацієнтів методом прямого підігріву термістора. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 16-тої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 16-17 травня 2017 р.). Київ: НТТУ «КПІ імені І. Сікорського», 2017. С. 112 – 113.

131. Матвиенко С. Н., Матвиенко А. М., Терещенко Н. Ф. Исследование теплопроводности неоднородных биологических растворов методом прямого разогрева термистора. Приборостроение – 2017: материалы X Международной научно-технической конференции (г.Минск, 1-3 ноября 2017г.). Минск: БНТУ, 2017. С. 50 – 51.

132. Valvano J. W., Badeau A. F., Pearce J. A. Simultaneous measurement of intrinsic and effective thermal conductivity. *Heat Transfer in Bioengineering and Medicine*. 1987. Vol. 95. P. 31 – 36.

133. Таранов В. Ф., Воробьёв Е. Н., Ковылин А. В., Фокин В. М. Определение теплофизических параметров теплоизоляционного материала «Астратек» нестационарными методами. *Интернет-вестник ВолгГАСУ. Политематическая сер.* 2010. Вып. 3, №13. С. 1-5. URL:

[http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Taranov-2010_3\(13\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Taranov-2010_3(13).pdf). (дата звернення: 25.08.2017)

134. Method and means of rapidly distinguishing a simulated diamond from natural diamond: патент 04364677 США, опубл. Oct. 21, 1982. 5 с.

135. Hudec J., Štofanič V., Kubičár L. Wireless device for monitoring the temperature-moisture regime in situ. Thermophysics 2014: Conference Proceedings, 19th International Meeting of Thermophysical Society. (Podkylava, 8th to 10th October 2014). Podkylava. 2014. P.171 – 176.

136. Матвиенко С. Н., Вислоух С. П., Матвиенко А. Н. Экспериментальная установка для измерения теплопроводности твердых материалов. Современная наука и образование: материалы II Всероссийской научно-практической конференции (г. Новосибирск, 14 января 2016 г.). Новосибирск: ООО «ЦСРНИ», 2016. С. 44-49.

137. Пристрій для вимірювання коефіцієнта теплопровідності різноманітних речовин: патент на корисну модель 119756 України, G01N 25/18 (2006.01) ин.; заявл. 29.03.2017, опубл. 10. 10. 2017, Бюл. №19. 10 с.

138. Матвієнко С. М., Матвієнко А. М. Підготовка зразків при дослідженні теплофізичних характеристик біологічних речовин. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 17-тої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 15-16 травня 2018 р.). Київ: НТТУ «КПІ імені І. Сікорського», 2018. С. 114–115.

139. Біометрія: Методичні вказівки до виконання комп'ютерного практикуму з дисципліни «Біометрія» для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» усіх форм навчання [Електронне видання] / Уклад.: С.П. Вислоух, К.С. Барандич, Волошко О.В.. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 106 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Графіки залежностей температури розігріву термістора

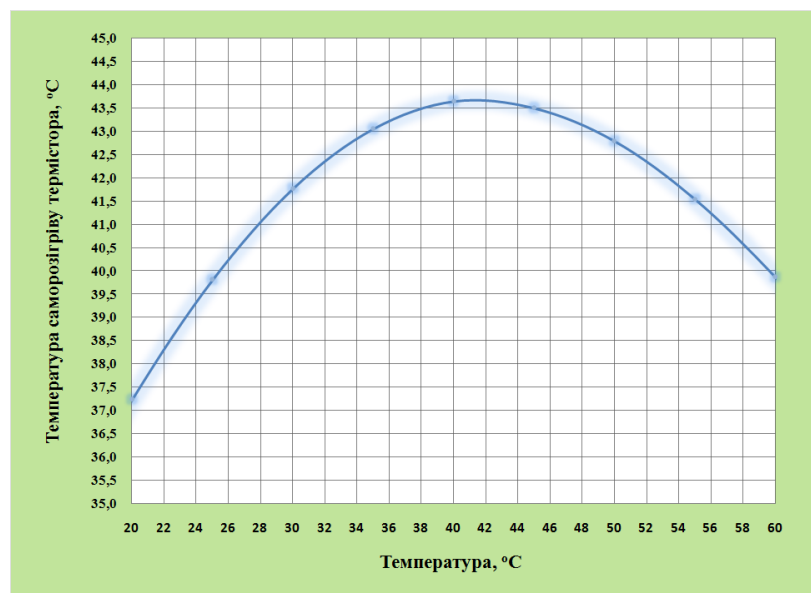


Рис. А.1. Графік залежності температури саморозігріву термістора, який знаходиться в повітрі в діапазоні температур від +20 °C до +60 °C.

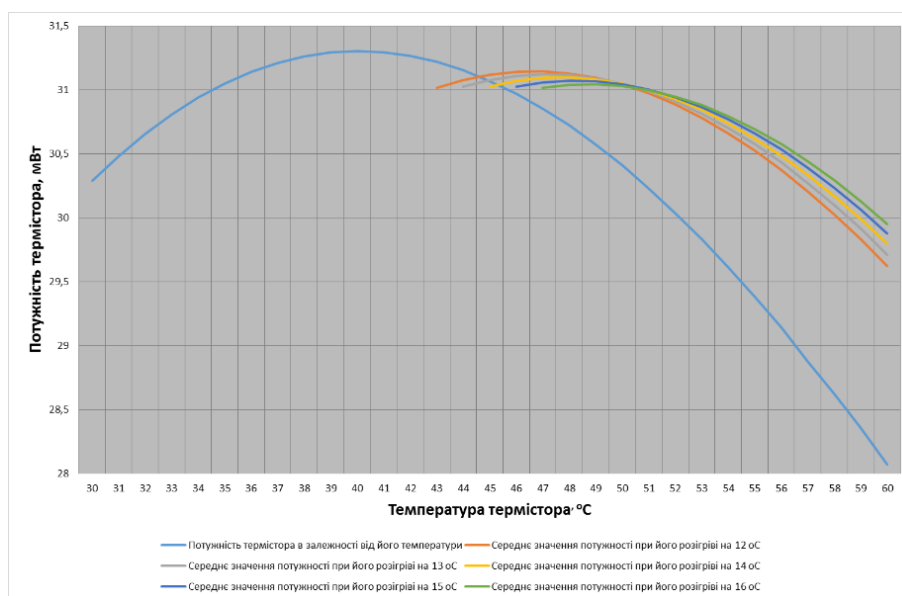


Рис. А.2 Графіки залежностей середнього значення потужності розігріву термістора від його температури.

Додаток Б

Електричні схеми, конструктивні елементи приладу та вікна програми обробки результатів досліджень

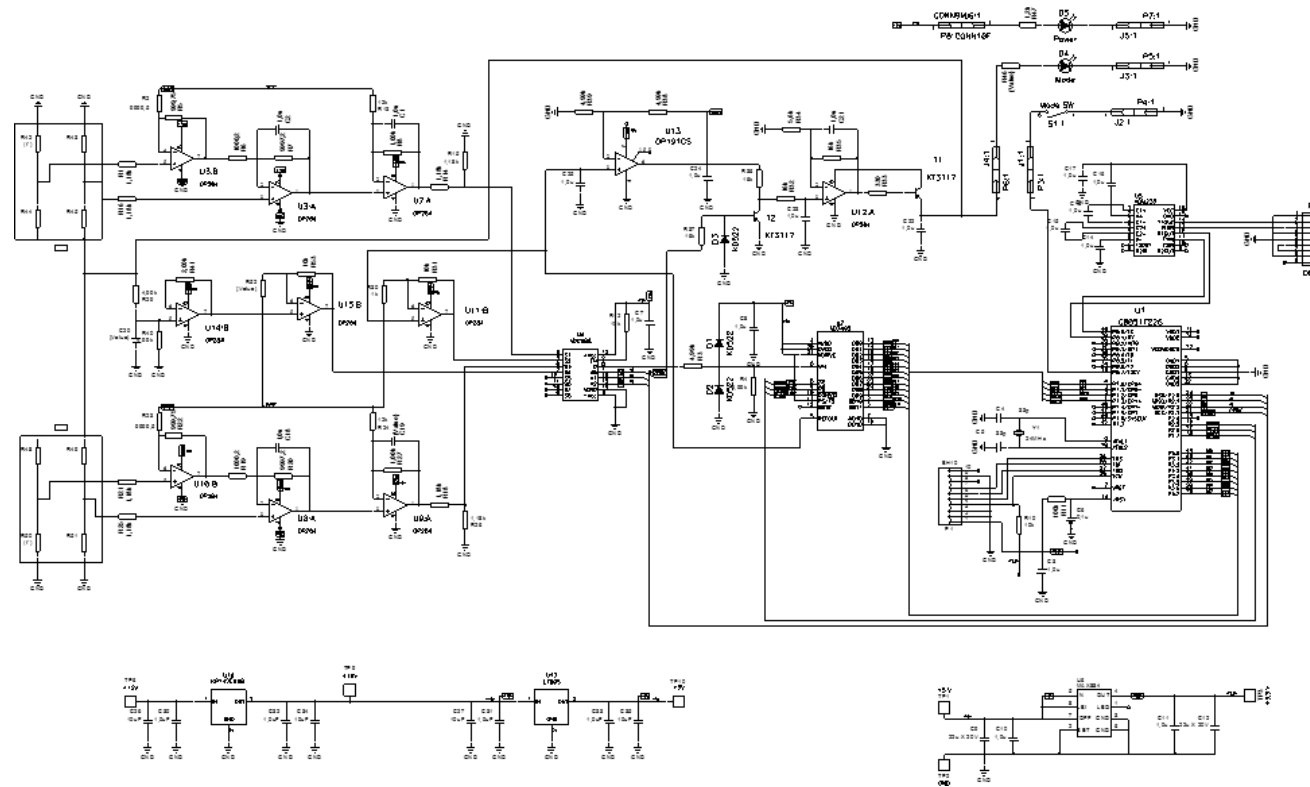


Рис. Б.1. Електрична схема дослідного стенду.

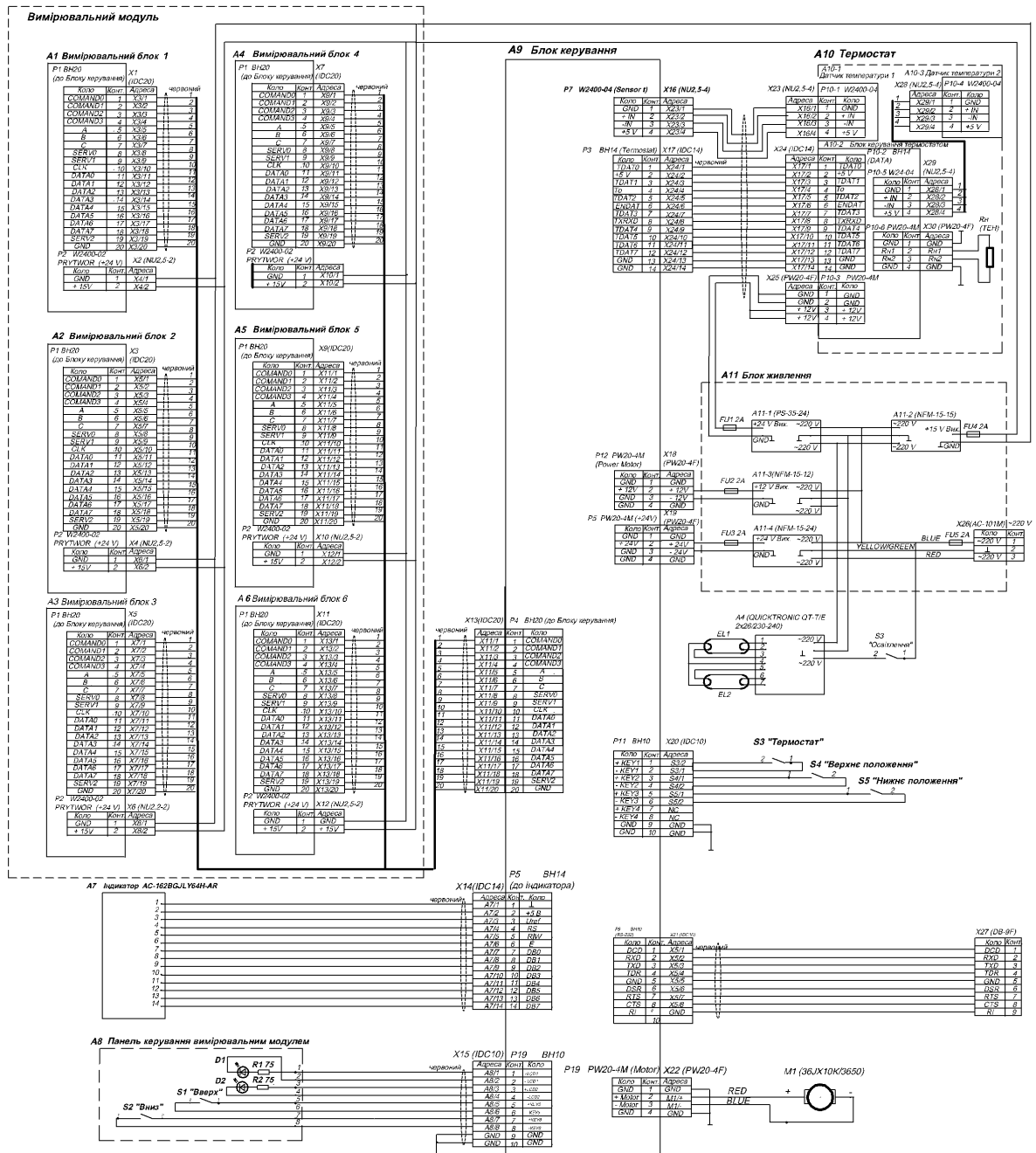


Рис. Б.2. Схема електрична принципова багатоканального приладу.



Рис. Б.3. Загальний вигляд корпусу приладу.



Рис. Б.4. Загальний вигляд шасі приладу.

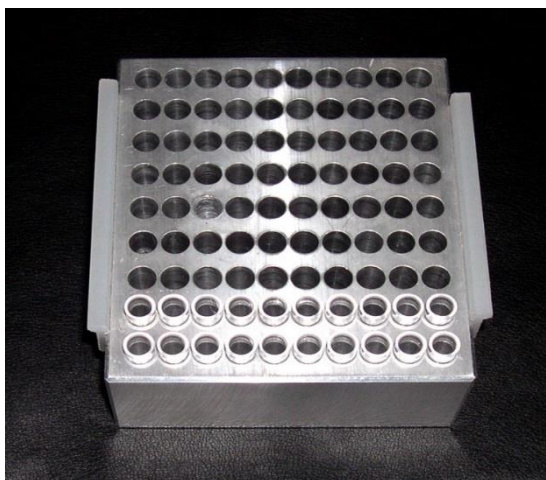


Рис. Б.5. Зовнішній вигляд контейнера.



Рис. Б.6. Загальний вигляд датчика температури контейнера.



Рис. Б.7. Загальний вигляд плати регулятора контейнера.

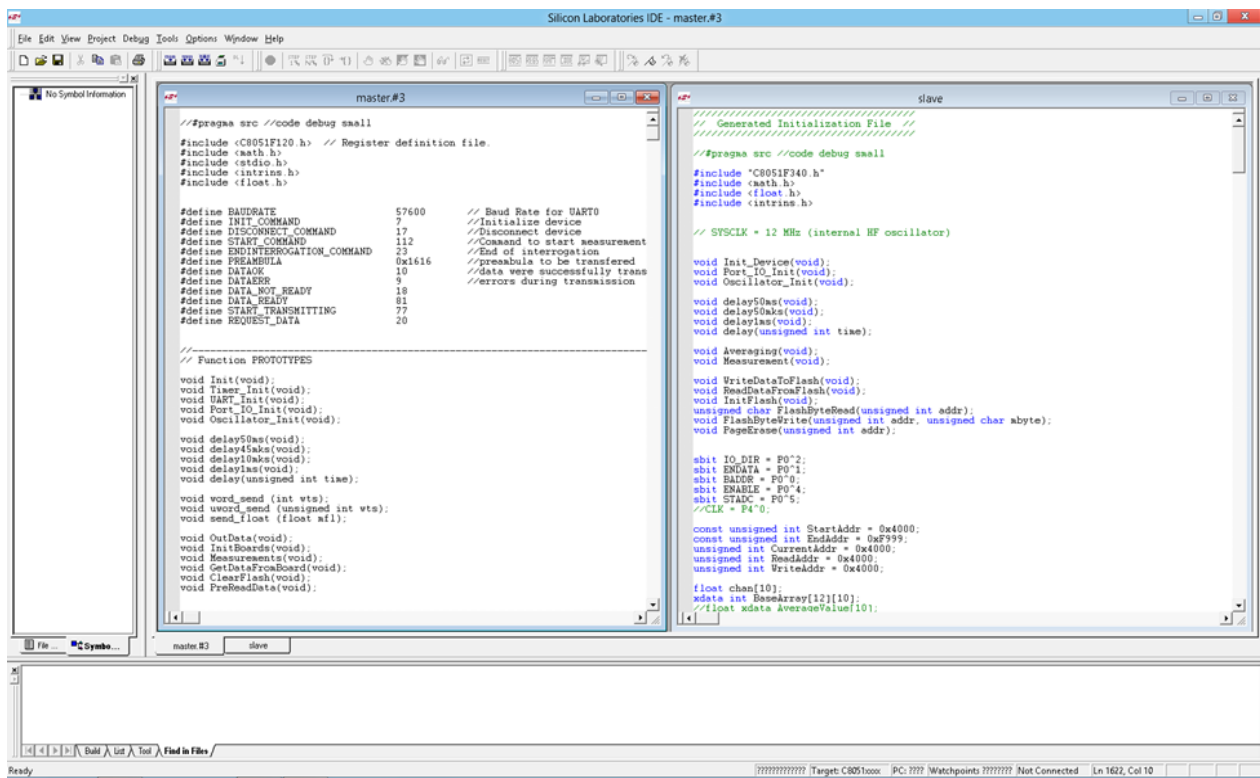


Рис. Б.8. Вікно інтегрованого середовища розробки SiLabs IDE з відкритими вікнами програм «master» та «slave».

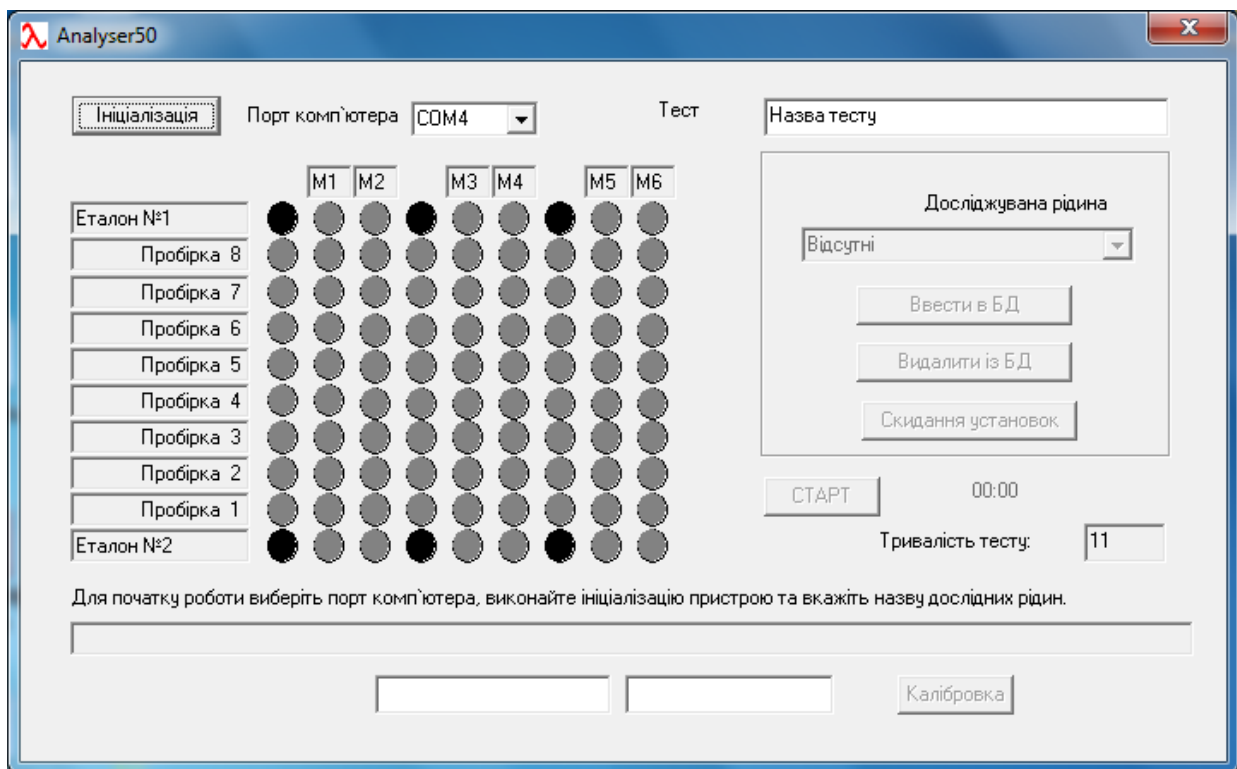


Рис. Б.9. Вікно програми «Analyser50» при її запуску.

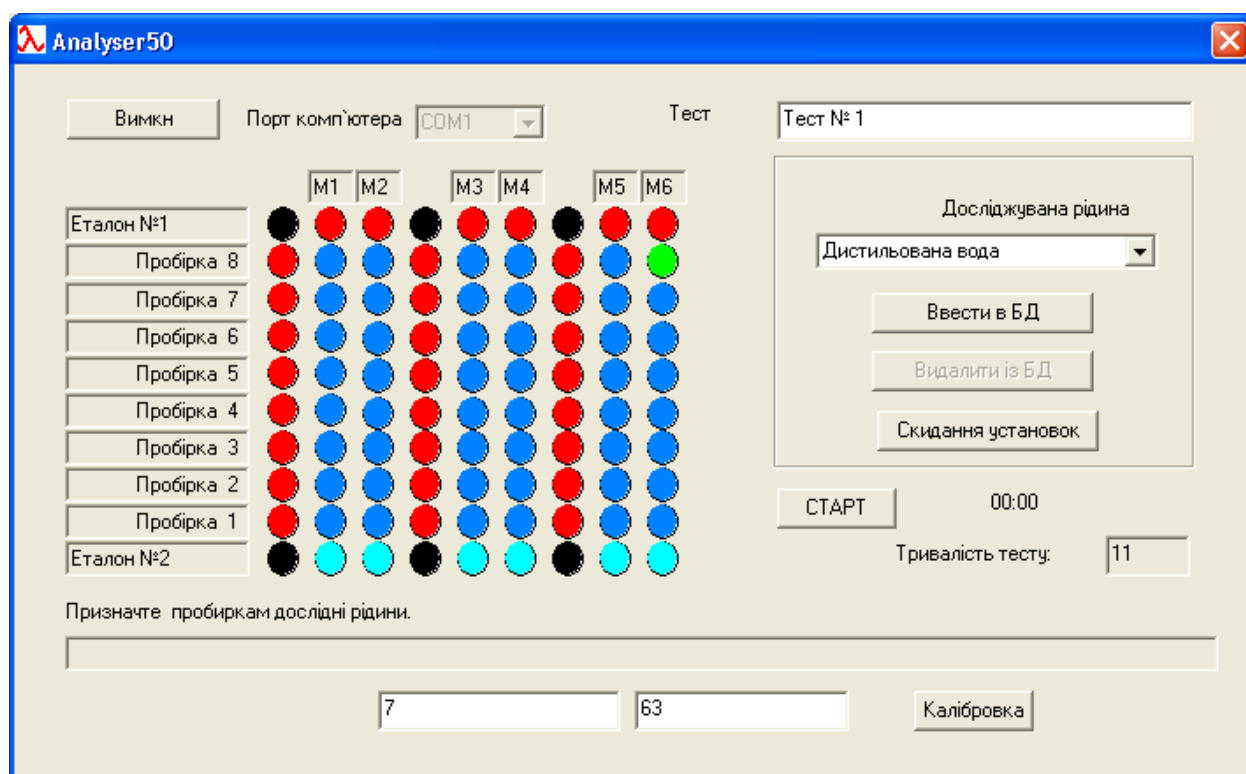


Рис. Б.10. Вікно програми «Analyser50» після повного введення назв досліджуваних рідин.

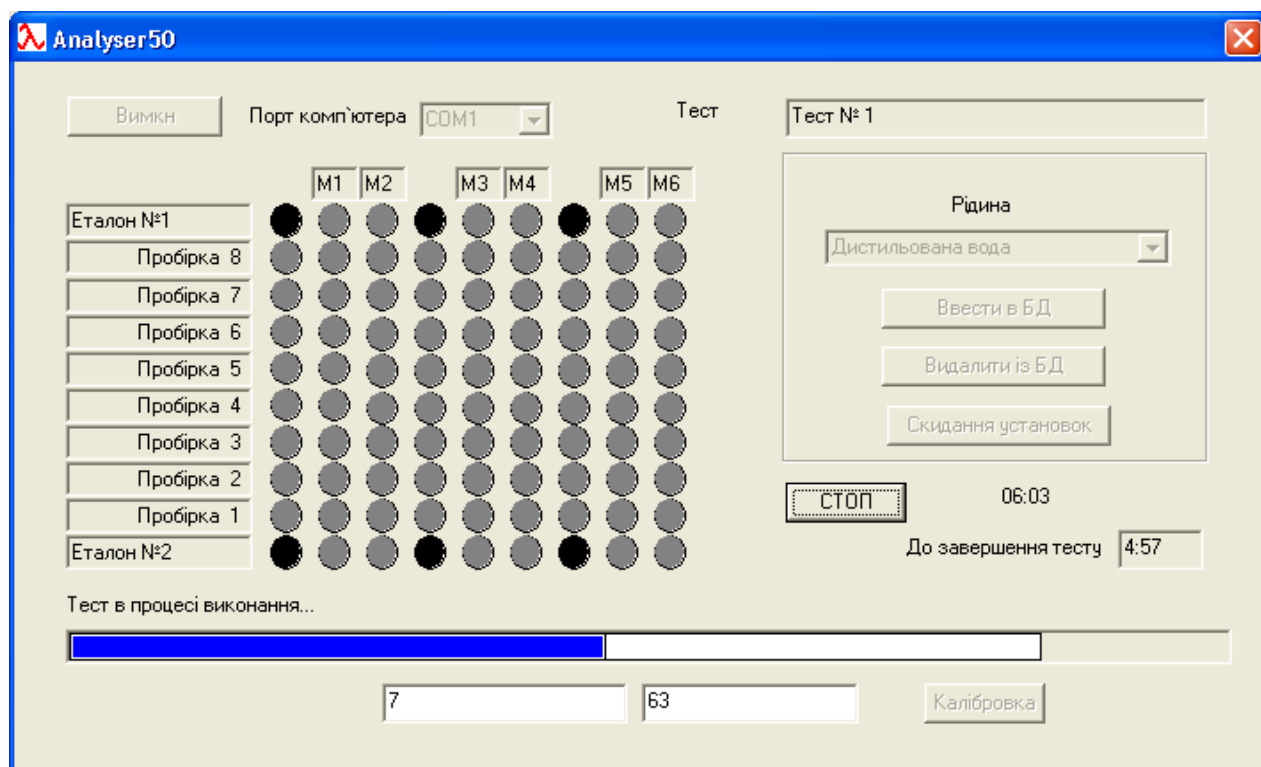


Рис. Б.11. Вікно програми «Analyser50» в ході виконання досліджень.

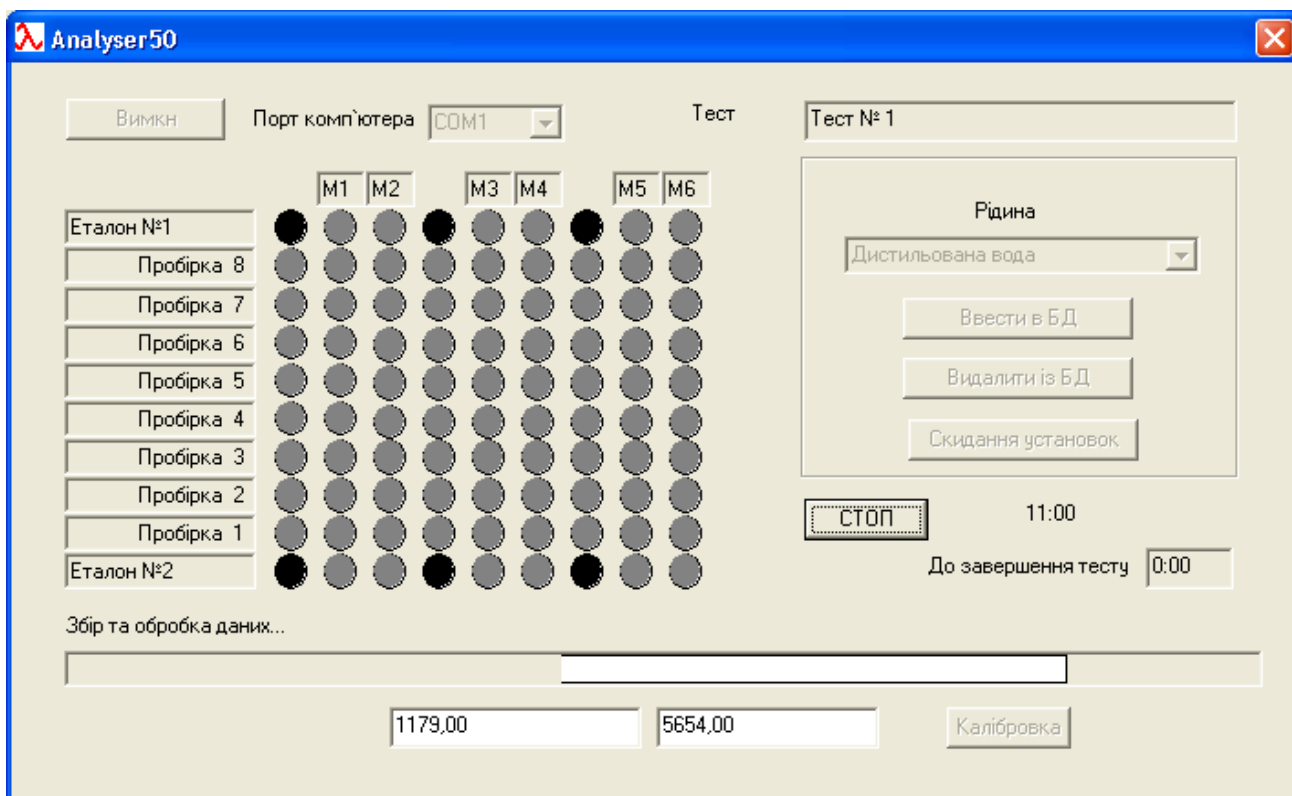


Рис. Б.12. Вікно програми «Analyser50» в ході передачі даних тестування на комп'ютер.

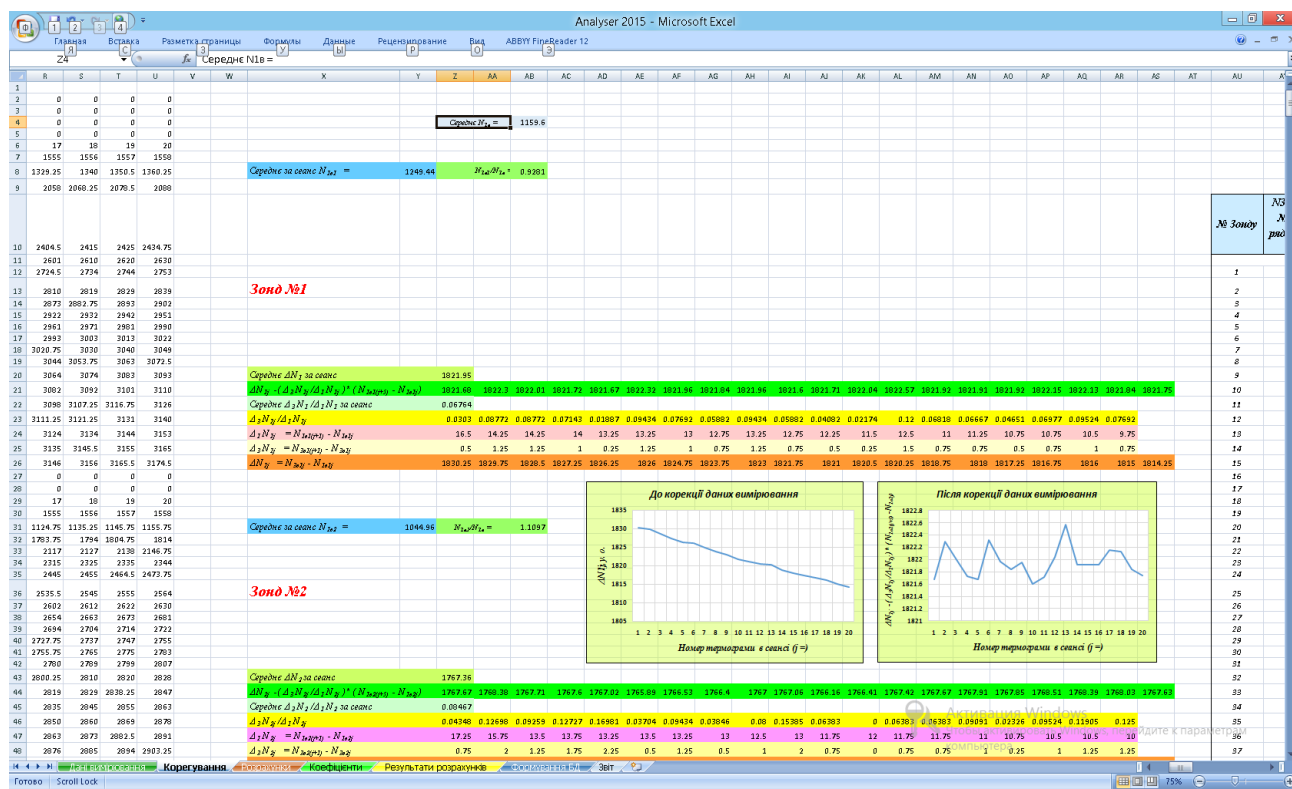


Рис. Б.13. Вікно сторінки «Корегування» (частина 1).

Analysir 2015 - Microsoft Excel

Головна Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид ABBYY FineReader 12

Середице N16 =

$$\lambda_{pi} = \frac{P_i}{4\pi \left((N_{10i} - N_{10i}) - (N_{10i}) - K_{10i} \right) * K_{10i} + K_{10i} \frac{T_{10i} - T_{10i}}{N_{10i}} - \Delta T_i + \frac{1}{K_{10i}}}$$

$(N_{10i}) * K_{10i}$

вмірювання (i)

№ Зонку

Номер термограми в сенсі вмірювання (i)

Середнє

| 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 | 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 | 192 | 193 | 194 | 195 | 196 | 197 | 198 | 199 | 200 | 201 | 202 | 203 | 204 | 205 | 206 | 207 | 208 | 209 | 210 | 211 | 212 | 213 | 214 | 215 | 216 | 217 | 218 | 219 | 220 | 221 | 222 | 223 | 224 | 225 | 226 | 227 | 228 | 229 | 230 | 231 | 232 | 233 | 234 | 235 | 236 | 237 | 238 | 239 | 240 | 241 | 242 | 243 | 244 | 245 | 246 | 247 | 248 | 249 | 250 | 251 | 252 | 253 | 254 | 255 | 256 | 257 | 258 | 259 | 260 | 261 | 262 | 263 | 264 | 265 | 266 | 267 | 268 | 269 | 270 | 271 | 272 | 273 | 274 | 275 | 276 | 277 | 278 | 279 | 280 | 281 | 282 | 283 | 284 | 285 | 286 | 287 | 288 | 289 | 290 | 291 | 292 | 293 | 294 | 295 | 296 | 297 | 298 | 299 | 300 | 301 | 302 | 303 | 304 | 305 | 306 | 307 | 308 | 309 | 310 | 311 | 312 | 313 | 314 | 315 | 316 | 317 | 318 | 319 | 320 | 321 | 322 | 323 | 324 | 325 | 326 | 327 | 328 | 329 | 330 | 331 | 332 | 333 | 334 | 335 | 336 | 337 | 338 | 339 | 340 | 341 | 342 | 343 | 344 | 345 | 346 | 347 | 348 | 349 | 350 | 351 | 352 | 353 | 354 | 355 | 356 | 357 | 358 | 359 | 360 | 361 | 362 | 363 | 364 | 365 | 366 | 367 | 368 | 369 | 370 | 371 | 372 | 373 | 374 | 375 | 376 | 377 | 378 | 379 | 380 | 381 | 382 | 383 | 384 | 385 | 386 | 387 | 388 | 389 | 390 | 391 | 392 | 393 | 394 | 395 | 396 | 397 | 398 | 399 | 400 | 401 | 402 | 403 | 404 | 405 | 406 | 407 | 408 | 409 | 410 | 411 | 412 | 413 | 414 | 415 | 416 | 417 | 418 | 419 | 420 | 421 | 422 | 423 | 424 | 425 | 426 | 427 | 428 | 429 | 430 | 431 | 432 | 433 | 434 | 435 | 436 | 437 | 438 | 439 | 440 | 441 | 442 | 443 | 444 | 445 | 446 | 447 | 448 | 449 | 450 | 451 | 452 | 453 | 454 | 455 | 456 | 457 | 458 | 459 | 460 | 461 | 462 | 463 | 464 | 465 | 466 | 467 | 468 | 469 | 470 | 471 | 472 | 473 | 474 | 475 | 476 | 477 | 478 | 479 | 480 | 481 | 482 | 483 | 484 | 485 | 486 | 487 | 488 | 489 | 490 | 491 | 492 | 493 | 494 | 495 | 496 | 497 | 498 | 499 | 500 | 501 | 502 | 503 | 504 | 505 | 506 | 507 | 508 | 509 | 510 | 511 | 512 | 513 | 514 | 515 | 516 | 517 | 518 | 519 | 520 | 521 | 522 | 523 | 524 | 525 | 526 | 527 | 528 | 529 | 530 | 531 | 532 | 533 | 534 | 535 | 536 | 537 | 538 | 539 | 540 | 541 | 542 | 543 | 544 | 545 | 546 | 547 | 548 | 549 | 550 | 551 | 552 | 553 | 554 | 555 | 556 | 557 | 558 | 559 | 560 | 561 | 562 | 563 | 564 | 565 | 566 | 567 | 568 | 569 | 570 | 571 | 572 | 573 | 574 | 575 | 576 | 577 | 578 | 579 | 580 | 581 | 582 | 583 | 584 | 585 | 586 | 587 | 588 | 589 | 590 | 591 | 592 | 593 | 594 | 595 | 596 | 597 | 598 | 599 | 600 | 601 | 602 | 603 | 604 | 605 | 606 | 607 | 608 | 609 | 610 | 611 | 612 | 613 | 614 | 615 | 616 | 617 | 618 | 619 | 620 | 621 | 622 | 623 | 624 | 625 | 626 | 627 | 628 | 629 | 630 | 631 | 632 | 633 | 634 | 635 | 636 | 637 | 638 | 639 | 640 | 641 | 642 | 643 | 644 | 645 | 646 | 647 | 648 | 649 | 650 | 651 | 652 | 653 | 654 | 655 | 656 | 657 | 658 | 659 | 660 | 661 | 662 | 663 | 664 | 665 | 666 | 667 | 668 | 669 | 670 | 671 | 672 | 673 | 674 | 675 | 676 | 677 | 678 | 679 | 680 | 681 | 682 | 683 | 684 | 685 | 686 | 687 | 688 | 689 | 690 | 691 | 692 | 693 | 694 | 695 | 696 | 697 | 698 | 699 | 700 | 701 | 702 | 703 | 704 | 705 | 706 | 707 | 708 | 709 | 710 | 711 | 712 | 713 | 714 | 715 | 716 | 717 | 718 | 719 | 720 | 721 | 722 | 723 | 724 | 725 | 726 | 727 | 728 | 729 | 730 | 731 | 732 | 733 | 734 | 735 | 736 | 737 | 738 | 739 | 740 | 741 | 742 | 743 | 744 | 745 | 746 | 747 | 748 | 749 | 750 | 751 | 752 | 753 | 754 | 755 | 756 | 757 | 758 | 759 | 760 | 761 | 762 | 763 | 764 | 765 | 766 | 767 | 768 | 769 | 770 | 771 | 772 | 773 | 774 | 775 | 776 | 777 | 778 | 779 | 780 | 781 | 782 | 783 | 784 | 785 | 786 | 787 | 788 | 789 | 790 | 791 | 792 | 793 | 794 | 795 | 796 | 797 | 798 | 799 | 800 | 801 | 802 | 803 | 804 | 805 | 806 | 807 | 808 | 809 | 810 | 811 | 812 | 813 | 814 | 815 | 816 | 817 | 818 | 819 | 820 | 821 | 822 | 823 | 824 | 825 | 826 | 827 | 828 | 829 | 830 | 831 | 832 | 833 | 834 | 835 | 836 | 837 | 838 | 839 | 840 | 841 | 842 | 843 | 844 | 845 | 846 | 847 | 848 | 849 | 850 | 851 | 852 | 853 | 854 | 855 | 856 | 857 | 858 | 859 | 860 | 861 | 862 | 863 | 864 | 865 | 866 | 867 | 868 | 869 | 870 | 871 | 872 | 873 | 874 | 875 | 876 | 877 | 878 | 879 | 880 | 881 | 882 | 883 | 884 | 885 | 886 | 887 | 888 | 889 | 890 | 891 | 892 | 893 | 894 | 895 | 896 | 897 | 898 | 899 | 900 | 901 | 902 | 903 | 904 | 905 | 906 | 907 | 908 | 909 | 910 | 911 | 912 | 913 | 914 | 915 | 916 | 917 | 918 | 919 | 920 | 921 | 922 | 923 | 924 | 925 | 926 | 927 | 928 | 929 | 930 | 931 | 932 | 933 | 934 | 935 | 936 | 937 | 938 | 939 | 940 | 941 | 942 | 943 | 944 | 945 | 946 | 947 | 948 | 949 | 950 | 951 | 952 | 953 | 954 | 955 | 956 | 957 | 958 | 959 | 960 | 961 | 962 | 963 | 964 | 965 | 966 | 967 | 968 | 969 | 970 | 971 | 972 | 973 | 974 | 975 | 976 | 977 | 978 | 979 | 980 | 981 | 982 | 983 | 984 | 985 | 986 | 987 | 988 | 989 | 990 | 991 | 992 | 993 | 994 | 995 | 996 | 997 | 998 | 999 | 1000 | 1001 | 1002 | 1003 | 1004 | 1005 | 1006 | 1007 | 1008 | 1009 | 1010 | 1011 | 1012 | 1013 | 1014 | 1015 | 1016 | 1017 | 1018 | 1019 | 1020 | 1021 | 1022 | 1023 | 1024 | 1025 | 1026 | 1027 | 1028 | 1029 | 1030 | 1031 | 1032 | 1033 | 1034 | 1035 | 1036 | 1037 | 1038 | 1039 | 1040 | 1041 | 1042 | 1043 | 1044 | 1045 | 1046 | 1047 | 1048 | 1049 | 1050 | 1051 | 1052 | 1053 | 1054 | 1055 | 1056 | 1057 | 1058 | 1059 | 1060 | 1061 | 1062 | 1063 | 1064 | 1065 | 1066 | 1067 | 1068 | 1069 | 1070 | 1071 | 1072 | 1073 | 1074 | 1075 | 1076 | 1077 | 1078 | 1079 | 1080 | 1081 | 1082 | 1083 | 1084 | 1085 | 1086 | 1087 | 1088 | 1089 | 1090 | 1091 | 1092 | 1093 | 1094 | 1095 | 1096 | 1097 | 1098 | 1099 | 1100 | 1101 | 1102 | 1103 | 1104 | 1105 | 1106 | 1107 | 1108 | 1109 | 1110 | 1111 | 1112 | 1113 | 1114 | 1115 | 1116 | 1117 | 1118 | 1119 | 1120 | 1121 | 1122 | 1123 | 1124 | 1125 | 1126 | 1127 | 1128 | 1129 | 1130 | 1131 | 1132 | 1133 | 1134 | 1135 | 1136 | 1137 | 1138 | 1139 | 1140 | 1141 | 1142 | 1143 | 1144 | 1145 | 1146 | 1147 | 1148 | 1149 | 1150 | 1151 | 1152 | 1153 | 1154 | 1155 | 1156 | 1157 | 1158 | 1159 | 1160 | 1161 | 1162 | 1163 | 1164 | 1165 | 1166 | 1167 | 1168 | 1169 | 1170 | 1171 | 1172 | 1173 | 1174 | 1175 | 1176 | 1177 | 1178 | 1179 | 1180 | 1181 | 1182 | 1183 | 1184 | 1185 | 1186 | 1187 | 1188 | 1189 | 1190 | 1191 | 1192 | 1193 | 1194 | 1195 | 1196 | 1197 | 1198 | 1199 | 1200 | 1201 | 1202 | 1203 | 1204 | 1205 | 1206 | 1207 | 1208 | 1209 | 1210 | 1211 | 1212 | 1213 | 1214 | 1215 | 1216 | 1217 | 1218 | 1219 | 1220 | 1221 | 1222 | 1223 | 1224 | 1225 | 1226 | 1227 | 1228 | 1229 | 1230 | 1231 | 1232 | 1233 | 1234 | 1235 | 1236 | 1237 | 1238 | 1239 | 1240 | 1241 | 1242 | 1243 | 1244 | 1245 | 1246 | 1247 | 1248 | 1249 | 1250 | 1251 | 1252 | 1253 | 1254 | 1255 | 1256 | 1257 | 1258 | 1259 | 1260 | 1261 | 1262 | 1263 | 1264 | 1265 | 1266 | 1267 | 1268 | 1269 | 1270 | 1271 | 1272 | 1273 | 1274 | 1275 | 1276 | 1277 | 1278 | 1279 | 1280 | 1281 | 1282 | 1283 | 1284 | 1285 | 1286 | 1287 | 1288 | 1289 | 1290 | 1291 | 1292 | 1293 | 1294 | 1295 | 1296 | 1297 | 1298 | 1299 | 1300 | 1301 | 1302 | 1303 | 1304 | 1305 | 1306 | 1307 | 1308 | 1309 | 1310 | 1311 | 1312 | 1313 | 1314 | 1315 | 1316 | 1317 | 1318 | 1319 | 1320 | 1321 | 1322 | 1323 | 1324 | 1325 | 1326 | 1327 | 1328 | 1329 | 1330 | 1331 | 1332 | 1333 | 1334 | 1335 | 1336 | 1337 | 1338 | 1339 | 1340 | 1341 | 1342 | 1343 | 1344 | 1345 | 1346 | 1347 | 1348 | 1349 | 1350 | 1351 | 1352 | 1353 | 1354 | 1355 | 1356 | 1357 | 1358 | 1359 | 1360 | 1361 | 1362 | 1363 | 1364 | 1365 | 1366 | 1367 | 1368 | 1369 | 1370 | 1371 | 1372 | 1373 | 1374 | 1375 | 1376 | 1377 | 1378 | 1379 | 1380 | 1381 | 1382 | 1383 | 1384 | 1385 | 1386 | 1387 | 1388 | 1389 | 1390 | 1391 | 1392 | 1393 | 1394 | 1395 | 1396 | 1397 | 1398 | 1399 | 1400 | 1401 | 1402 | 1403 | 1404 | 1405 | 1406 | 1407 | 1408 | 1409 | 1410 | 1411 | 1412 | 1413 | 1414 | 1415 | 1416 | 1417 | 1418 | 1419 | 1420 | 1421 | 1422 | 1423 | 1424 | 1425 | 1426 | 1427 | 1428 | 1429 | 1430 | 1431 | 1432 | 1433 | 1434 | 1435 | 1436 | 1437 | 1438 | 1439 | 1440 | 1441 | 1442 | 1443 | 1444 | 1445 | 1446 | 1447 | 1448 | 1449 | 1450 | 1451 | 1452 | 1453 | 1454 | 1455 | 1456 | 1457 | 1458 | 1459 | 1460 | 1461 | 1462 | 1463 | 1464 | 1465 | 1466 | 1467 | 1468 | 1469 | 1470 | 1471 | 1472</ |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|

Analysier 2015 - Microsoft Excel

$$\lambda_{\phi, P_i} = \frac{P_T}{4\pi \left((N_{\text{sei}} - N_{\text{lei}}) - (N_{(+40)} - K_{\text{ei}} N_{\text{lei}}) * K_{\text{di}} \right) * K_{\text{ei}} \frac{T_{(+40)} - T_0}{N_{(+40)}} - \Delta T_0 \right) * \frac{1}{K_0}}$$

| Корегування | | | | | Розрахунок коефіцієнта теплопровідності | | | | |
|-------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|---|--|-------------------------|--------------|----------|
| № Зонду | K_{di} | K_{ei} | $N_{(+40)}$ | K_{di} | T_0 | $\frac{(T_{(+40)} - T_0) N_{(+40)}}{I N_{\phi} C_{\text{у.о.}}}$ | $P_T / 4 \pi n \cdot r$ | ΔT_0 | K_0 |
| 1 | 1.032997 | 0.986559 | 1394.1 | 0.924477882 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 2 | 0.993231 | 1.012097 | 1394.1 | 1.08207791 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 3 | 0.971093 | 0.966821 | 1394.1 | 0.975876201 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 4 | 1.01081 | 1.051556 | 1394.1 | 1.071515501 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 5 | 0.931061 | 0.927238 | 1394.1 | 0.951374857 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 6 | 0.985795 | 1.005011 | 1394.1 | 0.979316502 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 7 | 0.975689 | 0.975561 | 1394.1 | 0.965345294 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 8 | 0.997131 | 1.035383 | 1394.1 | 1.099993968 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 9 | 0.959701 | 0.963818 | 1394.1 | 0.975135427 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 10 | 0.937769 | 0.957932 | 1394.1 | 1.127840954 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 11 | 0.93009 | 0.897588 | 1394.1 | 0.931346493 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 12 | 1.082166 | 1.024283 | 1394.1 | 0.854405282 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 13 | 1.052055 | 1.009587 | 1394.1 | 0.885194804 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 14 | 1.090659 | 1.073493 | 1394.1 | 0.903357915 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 15 | 1.101617 | 1.118825 | 1394.1 | 0.940175077 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 16 | 1.08605 | 1.045933 | 1394.1 | 0.876381916 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 17 | 1.108053 | 1.115547 | 1394.1 | 0.988995308 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 18 | 1.110396 | 1.076745 | 1394.1 | 0.880013033 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 19 | 1.150471 | 1.156003 | 1394.1 | 0.943295575 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 20 | 1.064206 | 1.070214 | 1394.1 | 1.034711137 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 21 | 1.049165 | 1.051443 | 1394.1 | 0.965560153 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 22 | 1.043639 | 1.035888 | 1394.1 | 0.970347883 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 23 | 1.041643 | 1.012083 | 1394.1 | 0.909021208 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 24 | 1.042889 | 1.03292 | 1394.1 | 0.951730638 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 25 | 1.09086 | 1.073292 | 1394.1 | 0.928910702 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 26 | 0.967927 | 0.975549 | 1394.1 | 1.042377078 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 27 | 0.8814 | 0.861661 | 1394.1 | 1.048272591 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 28 | 1.059852 | 1.094039 | 1394.1 | 1.00622463 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 29 | 0.940862 | 1.012097 | 1394.1 | 1.024327458 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 30 | 1.074608 | 1.043245 | 1394.1 | 0.947313208 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 31 | 1.005568 | 1.038356 | 1394.1 | 1.043764738 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |
| 32 | 0.920904 | 0.940388 | 1394.1 | 0.959266627 | 30.78200 | 0.007326 | 2.768931352 | 10.8979889 | 0.439866 |

Активация Windows
Чтобы активировать Windows, перейдите к параметрам компьютера.

Рис. Б.16. Вікно сторінки «Коефіцієнти».

Analysier 2015 - Excel

Файл ГЛАВНАЯ ВСТАВКА РАЗМЕТКА СТРАНИЦЫ ФОРМУЛЫ ДАННЫЕ РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ ВИД ABBYY FineReader 12

E13

1 Формування файлу Баз даних

2

3

4 Назва файлу:

5

6 Дата формування файлу:

7

8

9

10 Формувати дані для бази даних

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

Дані вимірювання Корегування Розрахунки Коефіцієнти Результати розрахунків Формування БД Звіт

ГОТОВО

Рис. Б.17. Вікно сторінки «Формування БД».

Analysar 2015 - Excel

ФАЙЛ ГЛАВНАЯ ВСТАВКА РАЗМЕТКА СТРАНИЦЫ ФОРМУЛЫ ДАННЫЕ РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ ВИД ABBYY FineReader 12

Г21

Звіт проведення тестування

Назва:

Дата та час проведення тестування:

Назва файлу даних тестування:

Оператор:

Дата та час оформлення звіту:

Висновки:

Посадова особа:

Формувати звіт

Дані вимірювання | Корегування | Розрахунки | Коефіцієнти | Результати розрахунків | Формування БД | **Звіт**

ГОТОВО

Рис. Б.18. Вікно сторінки «Звіт».

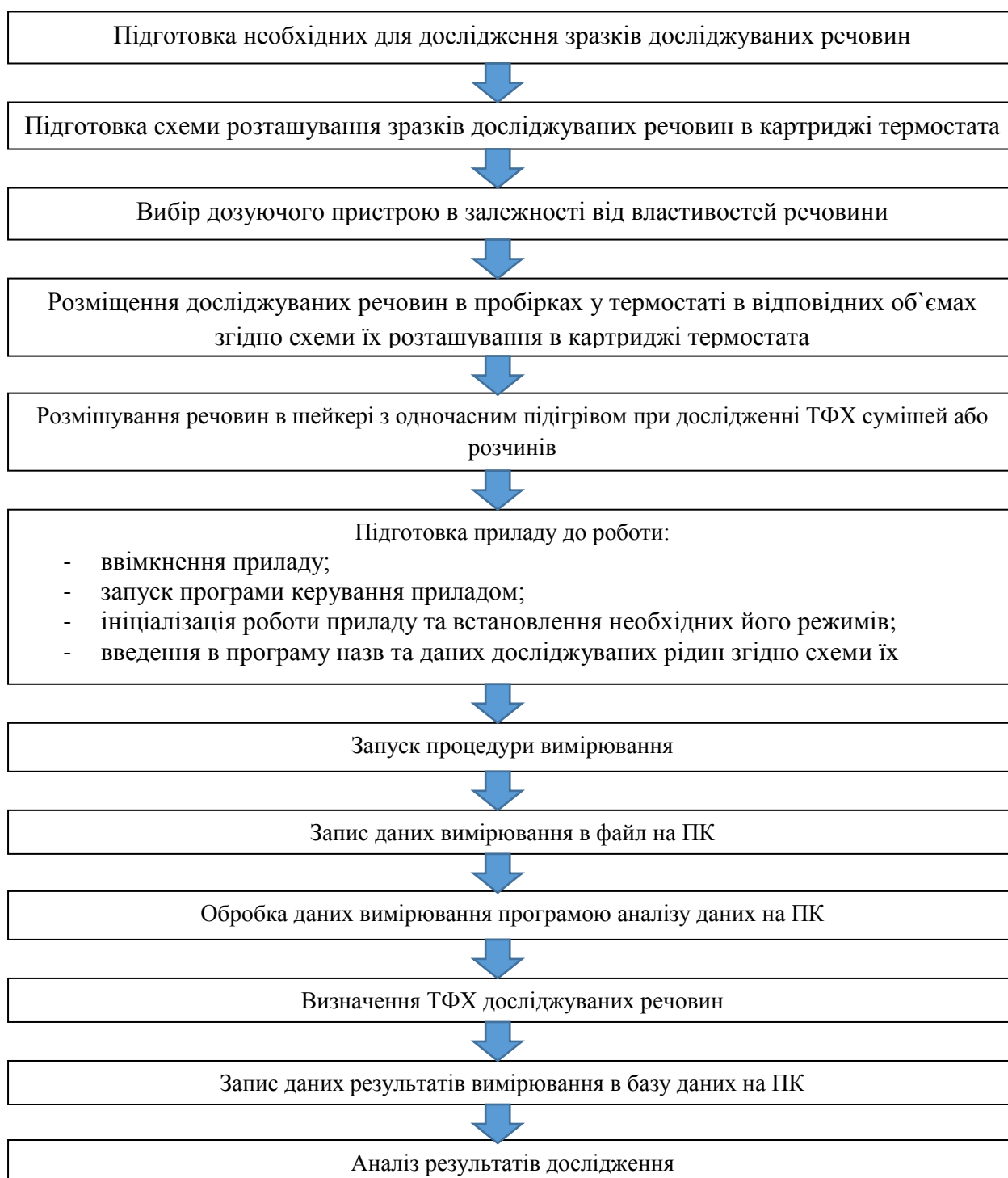


Рис. Б.19. Послідовність процедури проведення досліджень.

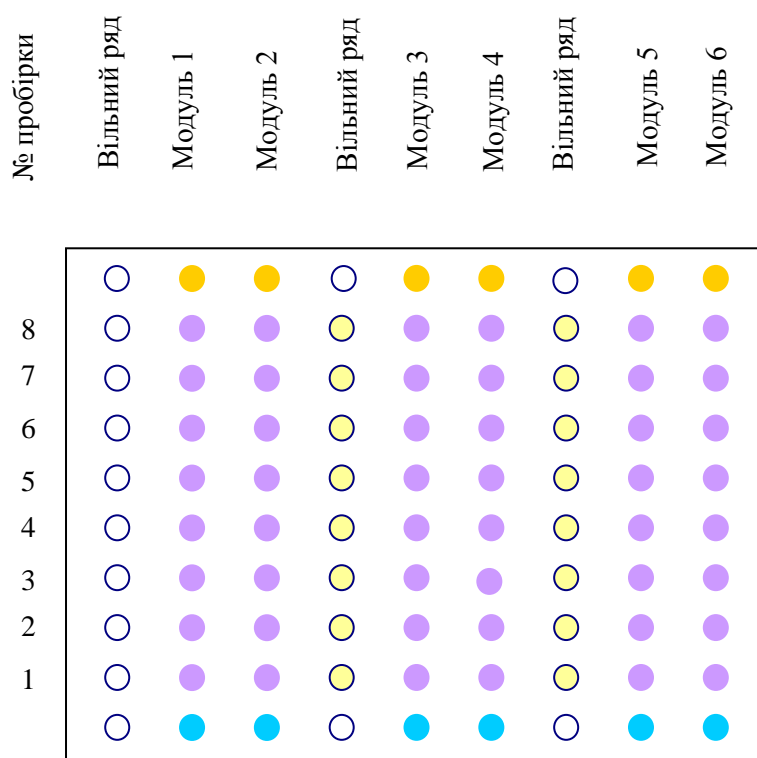


Рис. Б.20. Схема топології картриджу досліджуваних речовин .

В наведеній схемі прийнято такі умовні позначення:

- – еталонна рідина №1 (для порівняння ТФХ з досліджуваною);
- – досліджувана рідина;
- – еталонна рідина №2 (для порівняння ТФХ з досліджуваною);
- – порожня пробірка (для підігріву рідин в наступному дослідженні);
- – резервні лунки картриджу.

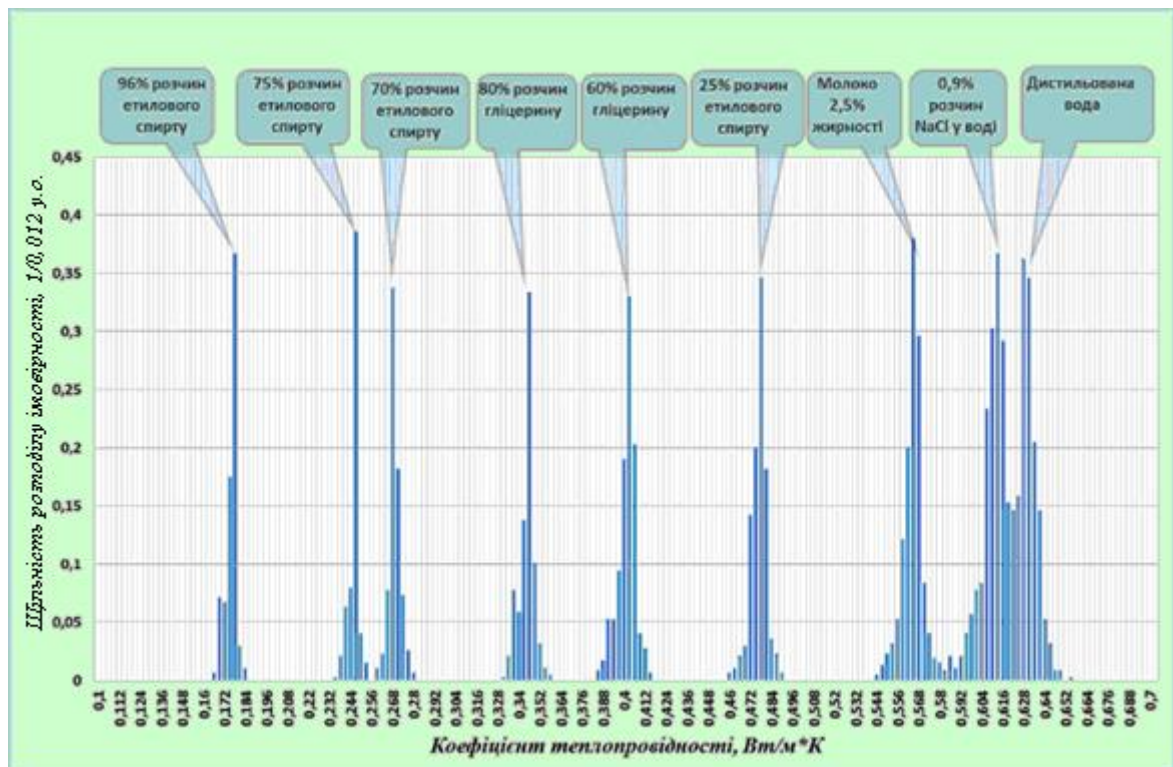


Рис. Б.21. Розподіл значень коефіцієнтів теплопровідності різних досліджуваних рідин.

Таблиця Б.1. Результати вимірювання $\Delta N_{\text{АЦП}}$ для різних досліджуваних розчинів.

| Еталонна рідина | $\Delta N_{\text{АЦП}}$ – значення на виході АЦП, у. о. | | | ΔT – Температура розігріву термістора, °C | | |
|-----------------------------|---|--------------------------------------|------------|---|------------------------------------|------------|
| | Середнє значення | Середньоквадратичне відхилення, у.о. | Похибка, % | Середнє значення | Середньоквадратичне відхилення, °C | Похибка, % |
| 96% розчин етилового спирту | 2442,613 | 17,43664 | 0,713852 | 17,89458 | 0,127741 | 0,713852 |
| 85% розчин гліцерину | 1972,567 | 5,969925 | 0,302648 | 14,45103 | 0,043736 | 0,302648 |
| Дистильована вода | 1752,005 | 2,916434 | 0,166463 | 12,835 | 0,021366 | 0,166463 |

Додаток В

Результати досліджень

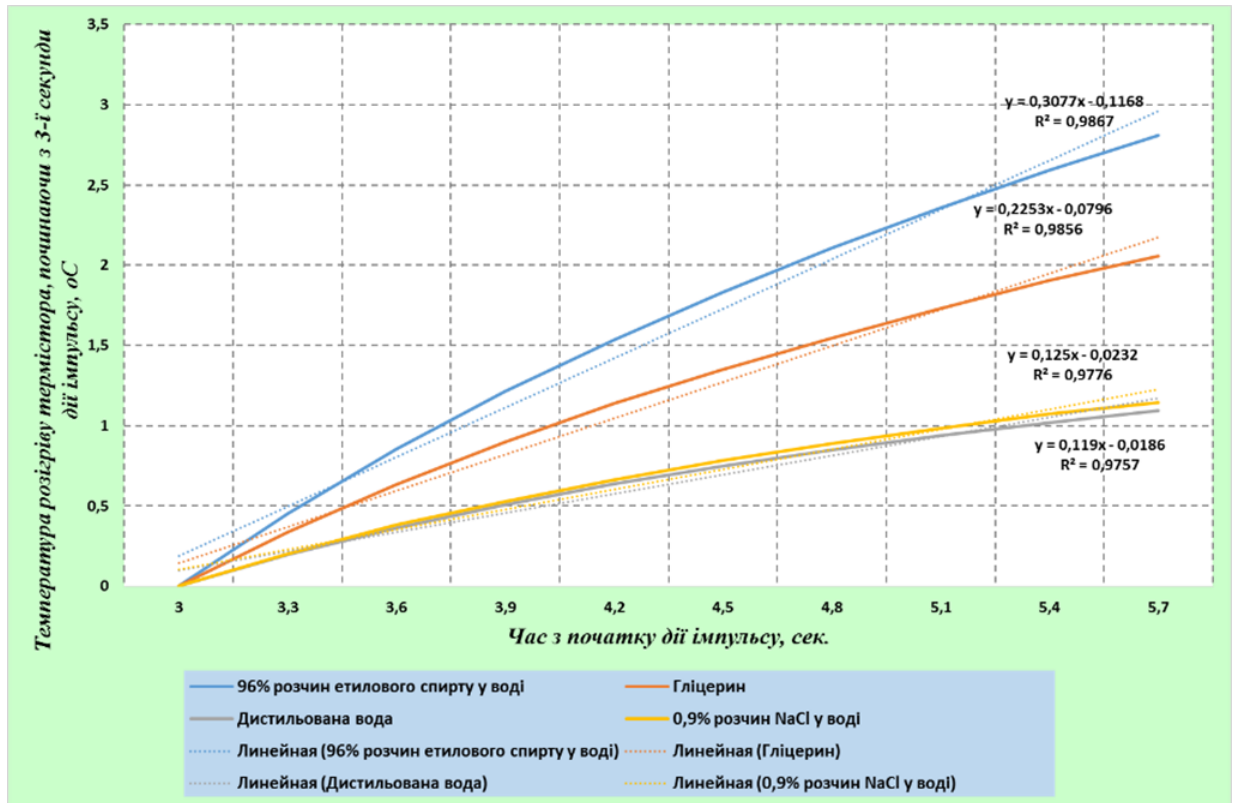


Рис. В.1. Термограми розігріву термістора з 3-ї по 6-ту секунди.

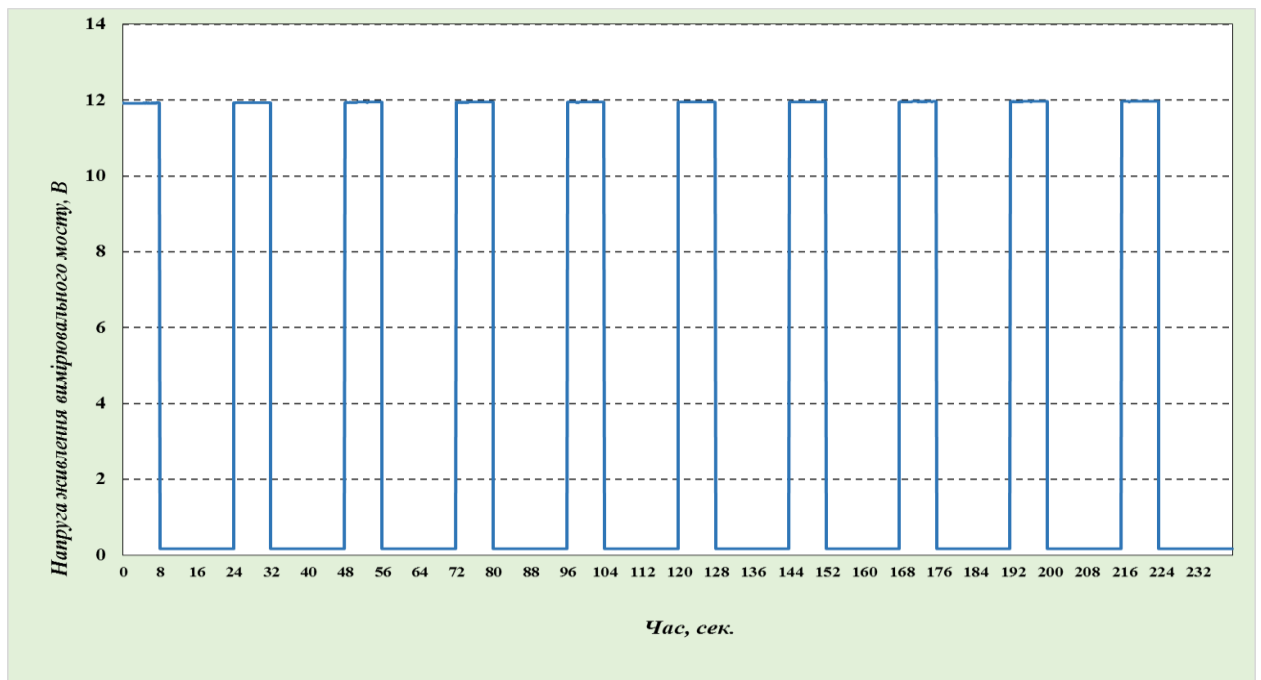


Рис. В.2. Осцилограма напруги живлення вимірювального мосту.

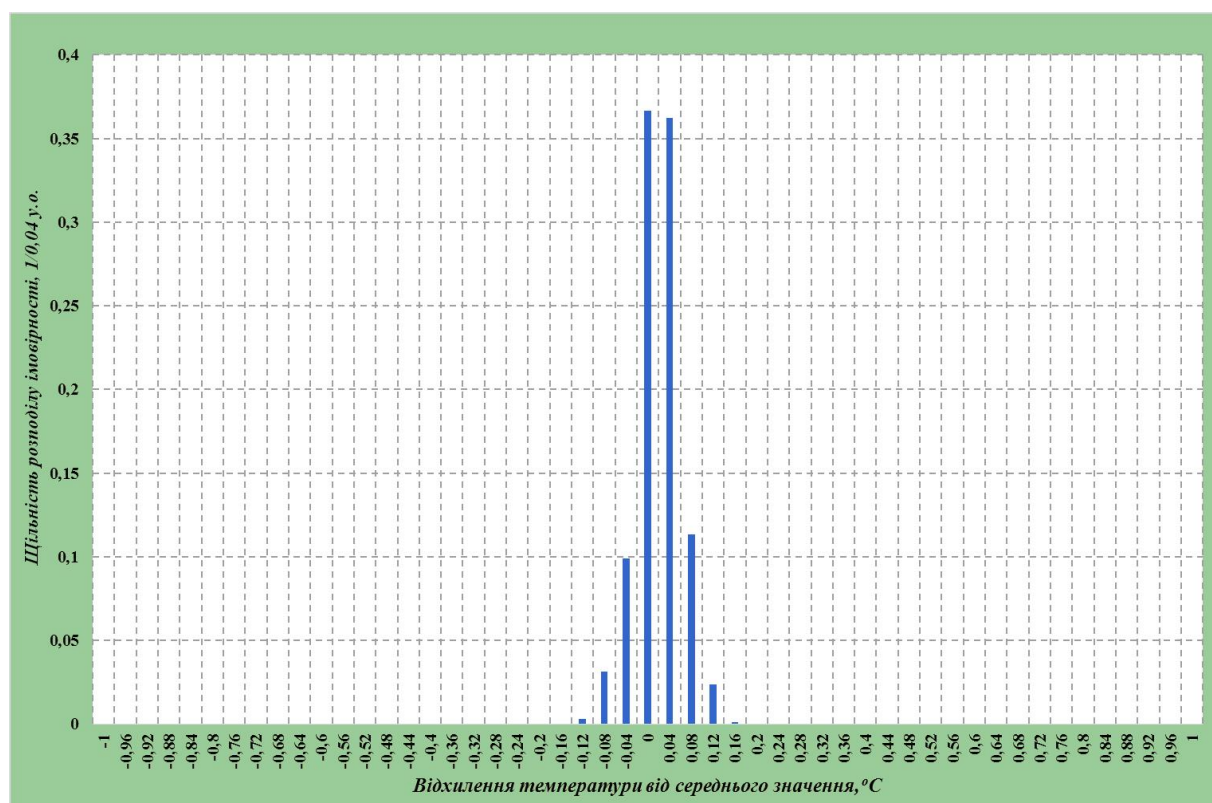


Рис. В.3. Гістограма щільності імовірності відхилення від середнього значення температури досліджуваних зразків у всьому масиві даних.

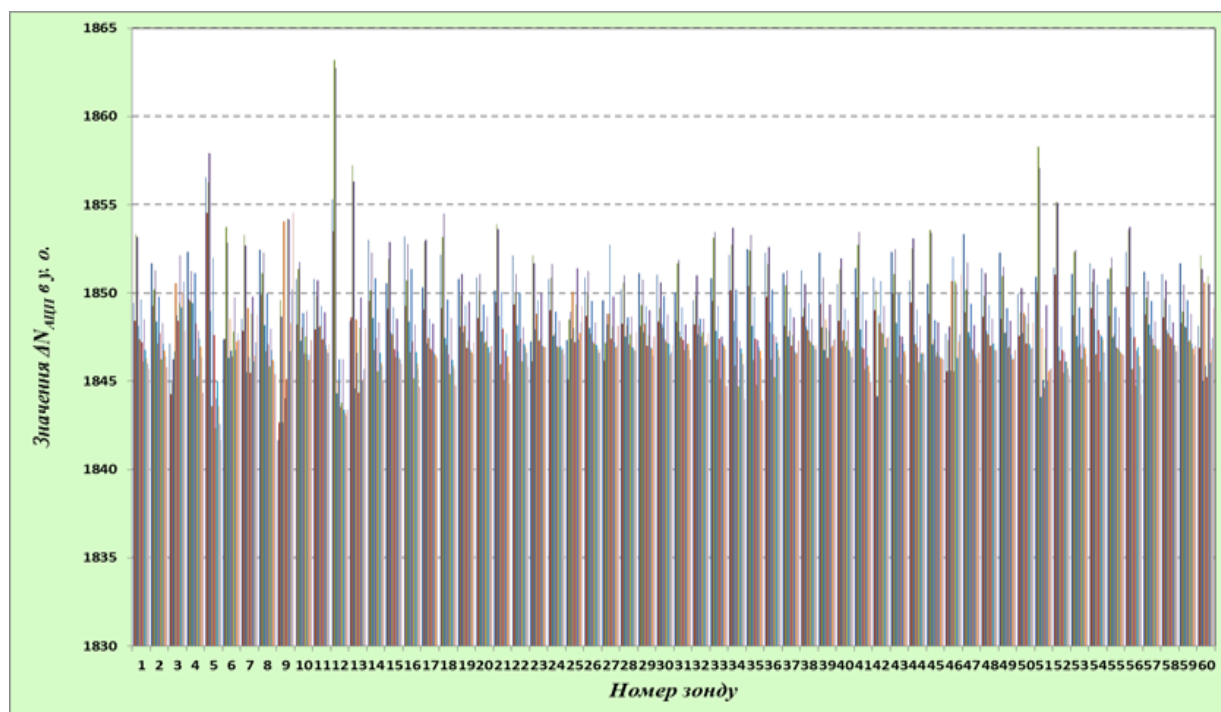


Рис. В.4. Гістограма розподілу похибки вимірювання шестидесяти чутливих елементів приладу в часі протягом циклу вимірювань.

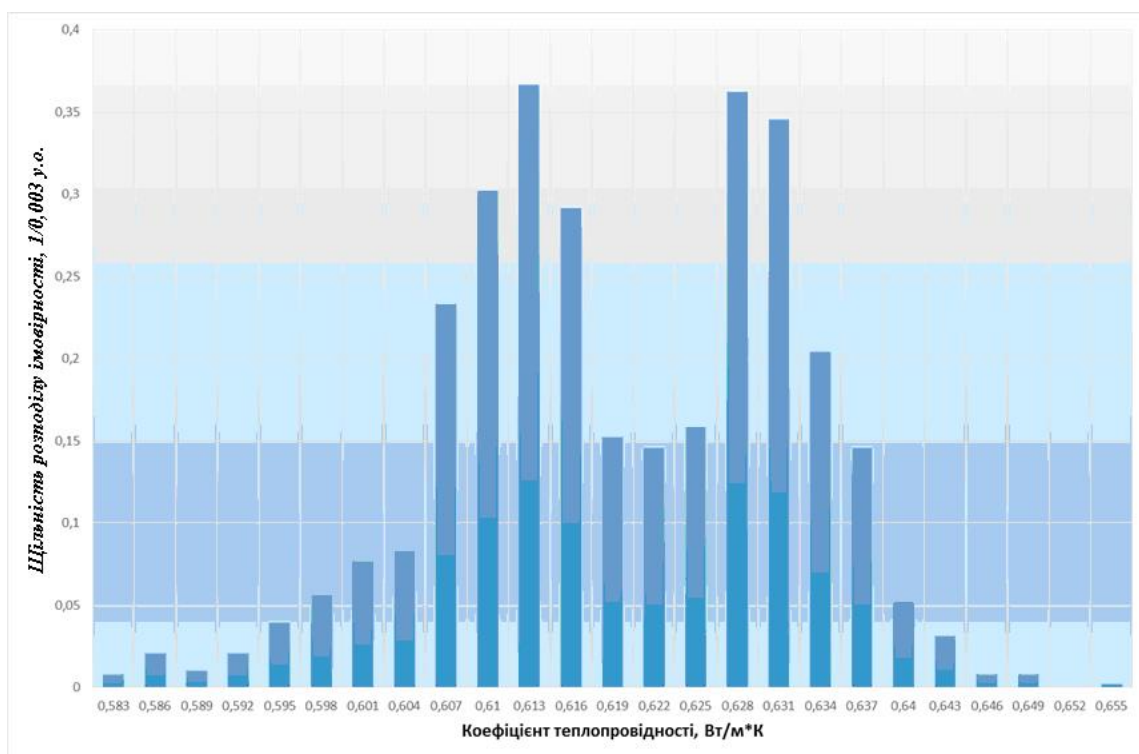


Рис. В.5. Щільність розподілу середніх значень коефіцієнтів теплопровідності дистильованої води та фізіологічного розчину.

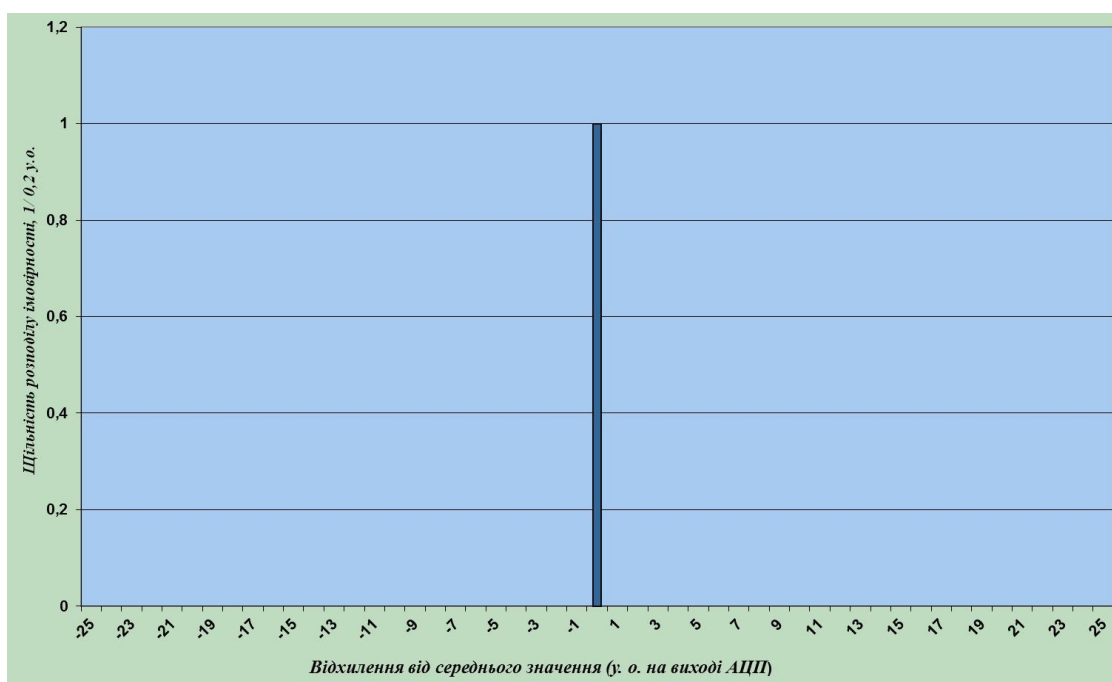


Рис. В.6. Щільність розподілу імовірності даних вимірювання після реалізації розробленого алгоритму видалення грубих похибок вимірювання.

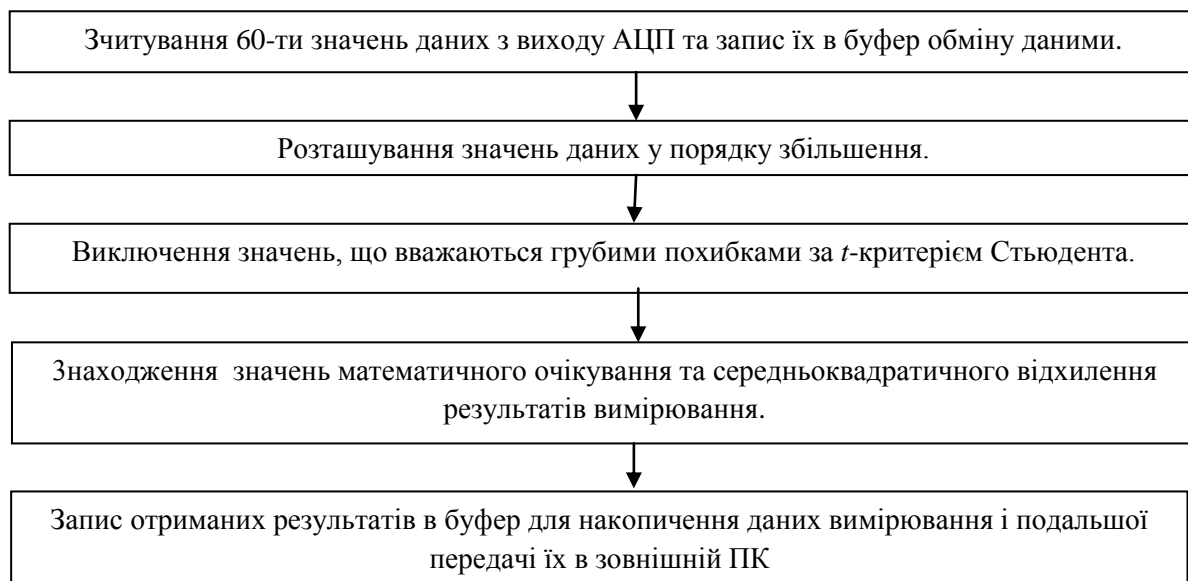


Рис. В.7. Спрощений алгоритм попередньої обробки даних в мікроконтролері вимірювального блоку.

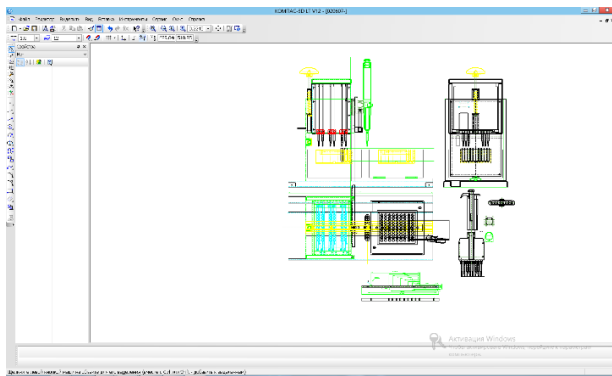


Рис. В.8. Модель розробленого приладу для в програмі AutoCad.

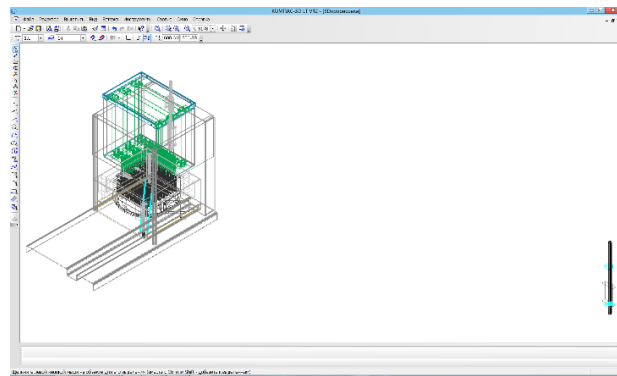


Рис. В.9. Складальне креслення та 3D – модель в програмі AutoCad механізмів переміщення термостата та касети з вимірювальними блоками.

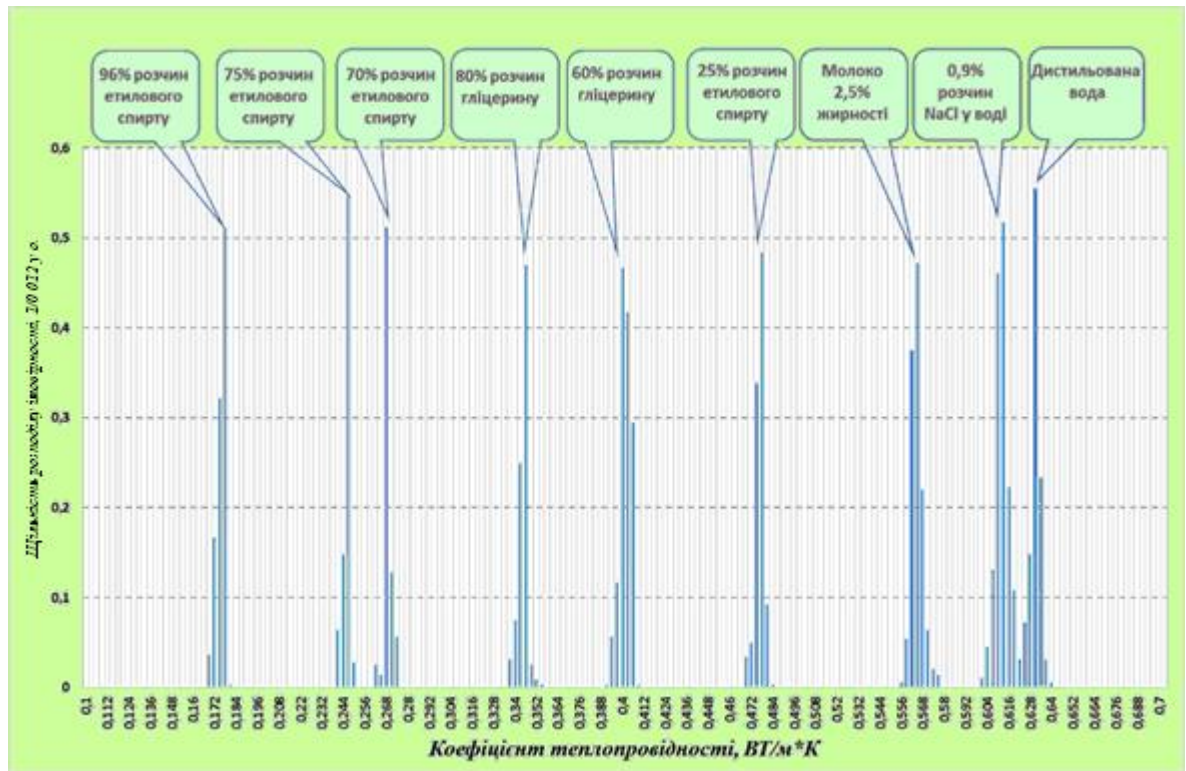


Рис. В.10. Щільність розподілу середніх значень коефіцієнтів теплопровідності.

Таблиця В.1. Значення корегуючих коефіцієнтів для кожного із зондів K_{ni} , визначене в результаті розрахунків та похибка його визначення.

| Зон д № | Середнє значенн я K_{ni} | Мінімальн е значення | Максимальн е значення | Максимальн е відхилення, % | | Стандартн е відхиленн я | Похибк а % | Значення $N_{АЦП}$ (у.о.) при +40 °С згідно математично ї моделі, $N_{(+40)}$ | Вимірян е середнє значення $N_{АЦП}$ (у.о.) при +40 °С $N_{Iem. Ivi}$ |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------------|------|----------------------------------|---------------|---|---|
| 1 | 0,9245 | 0,9054 | 0,9368 | -1,90 | 1,23 | 0,0074 | 0,80 | 1394,10 | 1507,99 |
| 2 | 1,0821 | 1,0676 | 1,1179 | -1,45 | 3,58 | 0,0102 | 0,94 | 1394,10 | 1288,35 |
| 3 | 0,9759 | 0,9609 | 1,0004 | -1,50 | 2,45 | 0,0067 | 0,69 | 1394,10 | 1428,56 |
| 4 | 1,0715 | 1,0577 | 1,1042 | -1,38 | 3,27 | 0,0095 | 0,89 | 1394,10 | 1301,05 |
| 5 | 0,9514 | 0,9264 | 0,9667 | -2,49 | 1,54 | 0,0082 | 0,87 | 1394,10 | 1465,35 |
| 6 | 0,9793 | 0,9669 | 0,9946 | -1,24 | 1,53 | 0,0058 | 0,59 | 1394,10 | 1423,54 |
| 7 | 0,9653 | 0,9485 | 0,9812 | -1,69 | 1,58 | 0,0064 | 0,67 | 1394,10 | 1444,15 |
| 8 | 1,1000 | 1,0816 | 1,1346 | -1,84 | 3,46 | 0,0116 | 1,06 | 1394,10 | 1267,37 |
| 9 | 0,9751 | 0,9608 | 1,0028 | -1,44 | 2,77 | 0,0070 | 0,72 | 1394,10 | 1429,65 |
| 10 | 1,1278 | 1,1066 | 1,1763 | -2,12 | 4,85 | 0,0140 | 1,24 | 1394,10 | 1236,08 |
| 11 | 0,9913 | 0,9810 | 1,0137 | -1,04 | 2,24 | 0,0057 | 0,57 | 1394,10 | 1406,27 |
| 12 | 0,8749 | 0,8465 | 0,9084 | -2,84 | 3,35 | 0,0127 | 1,45 | 1394,10 | 1593,37 |
| 13 | 0,8897 | 0,8438 | 0,9005 | -4,58 | 1,09 | 0,0145 | 1,63 | 1394,10 | 1567,00 |
| 14 | 0,9034 | 0,8846 | 0,9161 | -1,88 | 1,27 | 0,0077 | 0,85 | 1394,10 | 1543,24 |
| 15 | 0,9402 | 0,9250 | 0,9525 | -1,51 | 1,24 | 0,0062 | 0,66 | 1394,10 | 1482,81 |
| 16 | 0,8764 | 0,8517 | 0,8910 | -2,47 | 1,46 | 0,0092 | 1,05 | 1394,10 | 1590,74 |
| 17 | 0,9890 | 0,9761 | 1,0056 | -1,29 | 1,66 | 0,0056 | 0,56 | 1394,10 | 1409,61 |
| 18 | 0,8800 | 0,8573 | 0,8931 | -2,27 | 1,30 | 0,0093 | 1,06 | 1394,10 | 1584,18 |
| 19 | 0,9433 | 0,9318 | 0,9536 | -1,15 | 1,03 | 0,0056 | 0,59 | 1394,10 | 1477,90 |
| 20 | 1,0347 | 1,0231 | 1,0665 | -1,17 | 3,18 | 0,0071 | 0,68 | 1394,10 | 1347,33 |
| 21 | 0,9656 | 0,9525 | 0,9866 | -1,30 | 2,11 | 0,0056 | 0,58 | 1394,10 | 1443,83 |
| 22 | 0,9703 | 0,9587 | 0,9914 | -1,17 | 2,11 | 0,0062 | 0,64 | 1394,10 | 1436,70 |
| 23 | 0,9090 | 0,8921 | 0,9229 | -1,69 | 1,39 | 0,0071 | 0,78 | 1394,10 | 1533,63 |
| 24 | 0,9517 | 0,9386 | 0,9676 | -1,32 | 1,59 | 0,0055 | 0,58 | 1394,10 | 1464,81 |
| 25 | 0,9289 | 0,9127 | 0,9416 | -1,62 | 1,27 | 0,0070 | 0,75 | 1394,10 | 1500,79 |
| 26 | 1,0424 | 1,0307 | 1,0739 | -1,17 | 3,15 | 0,0087 | 0,83 | 1394,10 | 1337,42 |
| 27 | 1,0483 | 1,0395 | 1,0740 | -0,87 | 2,57 | 0,0076 | 0,72 | 1394,10 | 1329,90 |
| 28 | 1,0062 | 0,9977 | 1,0257 | -0,85 | 1,95 | 0,0052 | 0,52 | 1394,10 | 1385,48 |
| 29 | 1,0243 | 1,0165 | 1,0473 | -0,78 | 2,30 | 0,0065 | 0,64 | 1394,10 | 1360,99 |
| 30 | 0,9473 | 0,9241 | 0,9668 | -2,32 | 1,95 | 0,0088 | 0,92 | 1394,10 | 1471,64 |
| 31 | 1,0438 | 1,0295 | 1,0786 | -1,43 | 3,49 | 0,0101 | 0,96 | 1394,10 | 1335,65 |
| 32 | 0,9593 | 0,9410 | 0,9787 | -1,82 | 1,94 | 0,0078 | 0,81 | 1394,10 | 1453,30 |
| 33 | 1,0567 | 1,0453 | 1,0919 | -1,14 | 3,52 | 0,0088 | 0,83 | 1394,10 | 1319,29 |
| 34 | 1,0024 | 0,9933 | 1,0290 | -0,91 | 2,66 | 0,0073 | 0,73 | 1394,10 | 1390,78 |
| 35 | 1,0539 | 1,0404 | 1,0871 | -1,35 | 3,32 | 0,0091 | 0,86 | 1394,10 | 1322,80 |
| 36 | 1,0857 | 1,0725 | 1,1243 | -1,32 | 3,86 | 0,0102 | 0,94 | 1394,10 | 1284,11 |
| 37 | 1,0009 | 0,9925 | 1,0212 | -0,83 | 2,04 | 0,0053 | 0,53 | 1394,10 | 1392,90 |

| | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|-------|------|--------|------|---------|---------|
| 38 | 0,9981 | 0,9916 | 1,0186 | -0,65 | 2,05 | 0,0052 | 0,52 | 1394,10 | 1396,80 |
| 39 | 1,0740 | 1,0023 | 1,1460 | -1,16 | 1,20 | 0,0148 | 1,45 | 1394,10 | 1298,08 |
| 40 | 1,0135 | 0,9888 | 1,1084 | -2,48 | 9,48 | 0,0268 | 2,64 | 1394,10 | 1375,47 |
| 41 | 0,9441 | 0,9242 | 0,9655 | -2,00 | 2,14 | 0,0068 | 0,72 | 1394,10 | 1476,60 |
| 42 | 0,9582 | 0,9360 | 0,9862 | -2,21 | 2,80 | 0,0091 | 0,95 | 1394,10 | 1454,97 |
| 43 | 0,9924 | 0,9761 | 1,0207 | -1,63 | 2,83 | 0,0079 | 0,80 | 1394,10 | 1404,80 |
| 44 | 0,9856 | 0,9685 | 1,0151 | -1,71 | 2,95 | 0,0079 | 0,81 | 1394,10 | 1414,44 |
| 45 | 1,0660 | 1,0519 | 1,1056 | -1,42 | 3,96 | 0,0106 | 1,00 | 1394,10 | 1307,73 |
| 46 | 1,0304 | 1,0180 | 1,0844 | -1,24 | 5,40 | 0,0100 | 0,97 | 1394,10 | 1352,93 |
| 47 | 1,1705 | 1,1445 | 1,2306 | -2,60 | 6,02 | 0,0185 | 1,58 | 1394,10 | 1191,06 |
| 48 | 1,0493 | 1,0375 | 1,0842 | -1,18 | 3,49 | 0,0087 | 0,83 | 1394,10 | 1328,57 |
| 49 | 1,1235 | 1,1005 | 1,1754 | -2,30 | 5,18 | 0,0156 | 1,39 | 1394,10 | 1240,82 |
| 50 | 1,0352 | 1,0226 | 1,0793 | -1,26 | 4,41 | 0,0104 | 1,00 | 1394,10 | 1346,69 |
| 51 | 1,0062 | 0,9977 | 1,0257 | -0,85 | 1,95 | 0,0052 | 0,52 | 1394,10 | 1385,48 |
| 52 | 1,0634 | 1,0466 | 1,0989 | -1,68 | 3,55 | 0,0084 | 0,79 | 1394,10 | 1310,98 |
| 53 | 1,0081 | 0,9960 | 1,0329 | -1,21 | 2,47 | 0,0065 | 0,65 | 1394,10 | 1382,85 |
| 54 | 1,0674 | 1,0515 | 1,1081 | -1,60 | 4,07 | 0,0107 | 1,00 | 1394,10 | 1306,07 |
| 55 | 1,0668 | 1,0547 | 1,1011 | -1,20 | 3,43 | 0,0080 | 0,75 | 1394,10 | 1306,83 |
| 56 | 1,0301 | 1,0211 | 1,0584 | -0,90 | 2,83 | 0,0065 | 0,64 | 1394,10 | 1353,38 |
| 57 | 1,0668 | 1,0547 | 1,1011 | -1,20 | 3,43 | 0,0080 | 0,75 | 1394,10 | 1306,83 |
| 58 | 1,0748 | 1,0618 | 1,1105 | -1,30 | 3,57 | 0,0096 | 0,89 | 1394,10 | 1297,10 |
| 59 | 1,1319 | 1,1110 | 1,1786 | -2,09 | 4,67 | 0,0137 | 1,21 | 1394,10 | 1231,61 |
| 60 | 1,0487 | 1,0185 | 1,0913 | -3,02 | 4,26 | 0,0134 | 1,28 | 1394,10 | 1329,35 |

Таблиця В.2. Визначення температури досліджуваних зразків картриджу.

| Температура | | | Коефіцієнт теплопровідності дистильованої води | |
|---------------------------------|------------|-------------|--|------------|
| Відносне відхилення температури | Похибка, % | Похибка, °C | Похибка, Вт / (м × К) | Похибка, % |
| 0,00097 | 0,1 | 0,039 | 0,00012 | 0,019 |

Таблиця В.3. Значення корегуючих коефіцієнтів K_{Pi} та K_{Ki} , одержаних за даними вимірювання за весь час випробування.

| Зонд | Середнє значення K_{Ki} | Мінімум | Максимум | Відхилення (%) | Середнє відхилення (%) | Середнє значення K_{Pi} | Похибка, % |
|------|---------------------------|----------|----------|----------------|------------------------|---------------------------|------------|
| 1 | 1.018689 | 1.011641 | 1.03015 | 0.942783 | 1.629021 | 0,084213 | 8,56 |
| 2 | 0.981856 | 0.972014 | 0.991081 | 0.936057 | 1.629021 | 0,089443 | 8,73 |
| 3 | 1.037046 | 1.025111 | 1.047466 | 1.159197 | 1.629021 | 0,0563 | 7,17 |
| 4 | 0.953247 | 0.948196 | 0.972486 | 1.15772 | 1.629021 | 0,098609 | 9,73 |
| 5 | 1.079353 | 1.063208 | 1.099238 | 1.944424 | 1.629021 | 0,178941 | 11,61 |
| 6 | 1.008945 | 0.993021 | 1.021854 | 1.454579 | 1.629021 | 0,050931 | 7,71 |
| 7 | 1.023339 | 1.016713 | 1.033171 | 0.84211 | 1.629021 | 0,06353 | 9,55 |
| 8 | 0.970745 | 0.963265 | 0.988192 | 1.209901 | 1.629021 | 0,095131 | 9,93 |
| 9 | 1.049597 | 1.036116 | 1.068486 | 1.698765 | 1.629021 | 0,03388 | 7,49 |
| 10 | 1.042694 | 1.036902 | 1.053348 | 0.85739 | 1.629021 | 0,072348 | 7,56 |
| 11 | 1.114151 | 1.103335 | 1.129833 | 1.47614 | 1.629021 | 0,076448 | 10,39 |
| 12 | 0.96454 | 0.918525 | 1.023763 | 5.075295 | 1.629021 | 0,110491 | 11,93 |
| 13 | 1.002127 | 0.989029 | 1.014687 | 1.285632 | 1.629021 | 0,07002 | 9,41 |
| 14 | 0.931946 | 0.925175 | 0.942691 | 0.816235 | 1.629021 | 0,113114 | 13,72 |
| 15 | 0.899833 | 0.892223 | 0.921941 | 1.337073 | 1.629021 | 0,086837 | 8,07 |
| 16 | 0.961394 | 0.954566 | 0.98459 | 1.443261 | 1.629021 | 0,114389 | 13,64 |
| 17 | 0.901882 | 0.894722 | 0.921605 | 1.21229 | 1.629021 | 0,093256 | 9,85 |
| 18 | 0.923592 | 0.914436 | 0.92869 | 0.658265 | 1.629021 | 0,099358 | 10,24 |
| 19 | 0.862504 | 0.85666 | 0.881575 | 1.074434 | 1.629021 | 0,083965 | 8,68 |
| 20 | 0.932349 | 0.928012 | 0.935757 | 0.361066 | 1.629021 | 0,081678 | 8,67 |
| 21 | 0.951295 | 0.949145 | 0.95459 | 0.258974 | 1.629021 | 0,09535 | 9,20 |
| 22 | 0.967043 | 0.957782 | 0.973257 | 0.748256 | 1.629021 | 0,101403 | 10,37 |
| 23 | 0.99001 | 0.976814 | 1.000812 | 1.187882 | 1.629021 | 0,053851 | 7,71 |
| 24 | 0.970869 | 0.963193 | 0.990577 | 1.329293 | 1.629021 | 0,091367 | 10,54 |
| 25 | 0.927433 | 0.916841 | 0.932432 | 0.723009 | 1.629021 | 0,037252 | 7,95 |
| 26 | 1.027264 | 1.019077 | 1.041622 | 1.15796 | 1.629021 | 0,075394 | 9,89 |
| 27 | 1.160811 | 1.152085 | 1.182871 | 1.786845 | 1.629021 | 0,055102 | 9,69 |
| 28 | 0.911801 | 0.901084 | 0.927496 | 1.204159 | 1.629021 | 0,075335 | 9,75 |
| 29 | 1.072089 | 1.062496 | 1.085112 | 1.212348 | 1.629021 | 0,076063 | 9,36 |
| 30 | 0.958762 | 0.951484 | 0.969421 | 0.859852 | 1.629021 | 0,08481 | 8,55 |
| 31 | 0.961603 | 0.948898 | 0.973872 | 1.200792 | 1.629021 | 0,084947 | 8,97 |
| 32 | 1.049551 | 0.99302 | 1.071966 | 4.142917 | 1.629021 | 0,073922 | 7,48 |
| 33 | 1.034871 | 1.02436 | 1.046017 | 1.120587 | 1.629021 | 0,086097 | 8,04 |
| 34 | 1.036829 | 1.026702 | 1.04962 | 1.18811 | 1.629021 | 0,103753 | 11,19 |
| 35 | 1.018566 | 1.012234 | 1.027213 | 0.762903 | 1.629021 | 0,099977 | 10,83 |
| 36 | 0.987507 | 0.982471 | 0.997587 | 0.746347 | 1.629021 | 0,095506 | 9,47 |
| 37 | 1.055412 | 1.044665 | 1.062631 | 0.948082 | 1.629021 | 0,081276 | 8,69 |
| 38 | 0.955703 | 0.946119 | 0.976203 | 1.437598 | 1.629021 | 0,089454 | 10,35 |
| 39 | 0.9593 | 0.930305 | 1.009142 | 3.781422 | 1.629021 | 0,080432 | 8,56 |
| 40 | 1.037057 | 1.012177 | 1.054102 | 2.173929 | 1.629021 | 0,097568 | 10,46 |

| | | | | | | | |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| 41 | 0.956071 | 0.94693 | 0.964004 | 0.816164 | 1.629021 | 0,099279 | 11,68 |
| 42 | 0.981648 | 0.964075 | 0.99454 | 1.495324 | 1.629021 | 0,068804 | 7,34 |
| 43 | 0.956106 | 0.940171 | 0.969081 | 1.382076 | 1.629021 | 0,100977 | 11,77 |
| 44 | 1.001304 | 0.995821 | 1.005152 | 0.467124 | 1.629021 | 0,086383 | 10,39 |
| 45 | 1.029248 | 1.024724 | 1.038121 | 0.689414 | 1.629021 | 0,073271 | 9,94 |
| 46 | 1.019556 | 1.009454 | 1.031405 | 1.119025 | 1.629021 | 0,034793 | 7,38 |
| 47 | 1.053274 | 0.991974 | 1.094185 | 5.382815 | 1.629021 | 0,087468 | 10,29 |
| 48 | 1.075784 | 1.065183 | 1.085536 | 1.094756 | 1.629021 | 0,079473 | 10,37 |
| 49 | 1.067885 | 1.058231 | 1.085249 | 1.442617 | 1.629021 | 0,079395 | 9,65 |
| 50 | 1.089547 | 1.027171 | 1.115606 | 4.817663 | 1.629021 | 0,067891 | 7,24 |
| 51 | 1.054778 | 0.991974 | 1.111359 | 6.296231 | 1.629021 | 0,088339 | 12,84 |
| 52 | 0.986546 | 0.945742 | 1.005248 | 2.9353 | 1.629021 | 0,09609 | 10,91 |
| 53 | 1.062814 | 1.019654 | 1.080538 | 3.23544 | 1.629021 | 0,084491 | 8,76 |
| 54 | 1.011451 | 0.984028 | 1.020523 | 1.845626 | 1.629021 | 0,087552 | 10,26 |
| 55 | 1.031015 | 1.003584 | 1.076032 | 3.734762 | 1.629021 | 0,034793 | 7,29 |
| 56 | 1.059716 | 1.049132 | 1.07693 | 1.47288 | 1.629021 | 0,1009 | 10,85 |
| 57 | 0.944563 | 0.938509 | 0.94906 | 0.498285 | 1.629021 | 0,083173 | 8,77 |
| 58 | 1.041775 | 1.035467 | 1.056244 | 1.082244 | 1.629021 | 0,077656 | 9,99 |
| 59 | 1.081274 | 1.069056 | 1.086727 | 0.955351 | 1.629021 | 0,075742 | 13,15 |
| 60 | 1.05352 | 1.02322 | 1.062408 | 2.064264 | 1.629021 | 0,050219 | 7,17 |

Додаток Г

Результати досліджень з біологічними та твердими речовинами

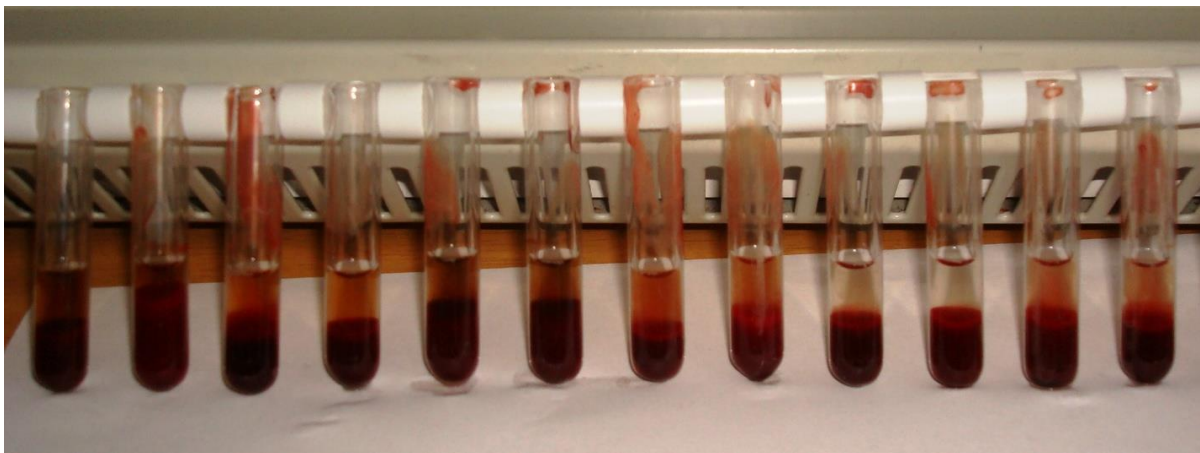


Рис. Г.1а. Загальний вигляд розшарування суміші кров+алерген.

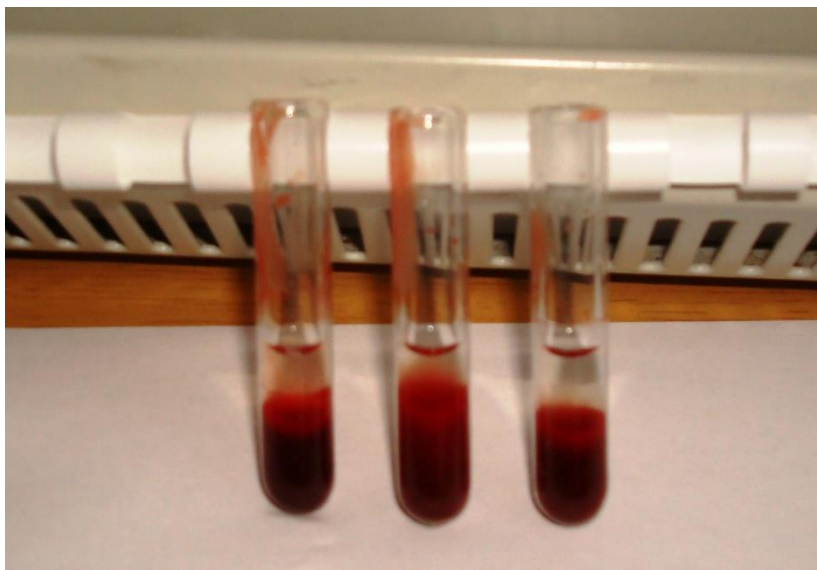


Рис. Г.1б. Загальний вигляд розшарування суміші кров+0,9% розчин алерген NaCl.

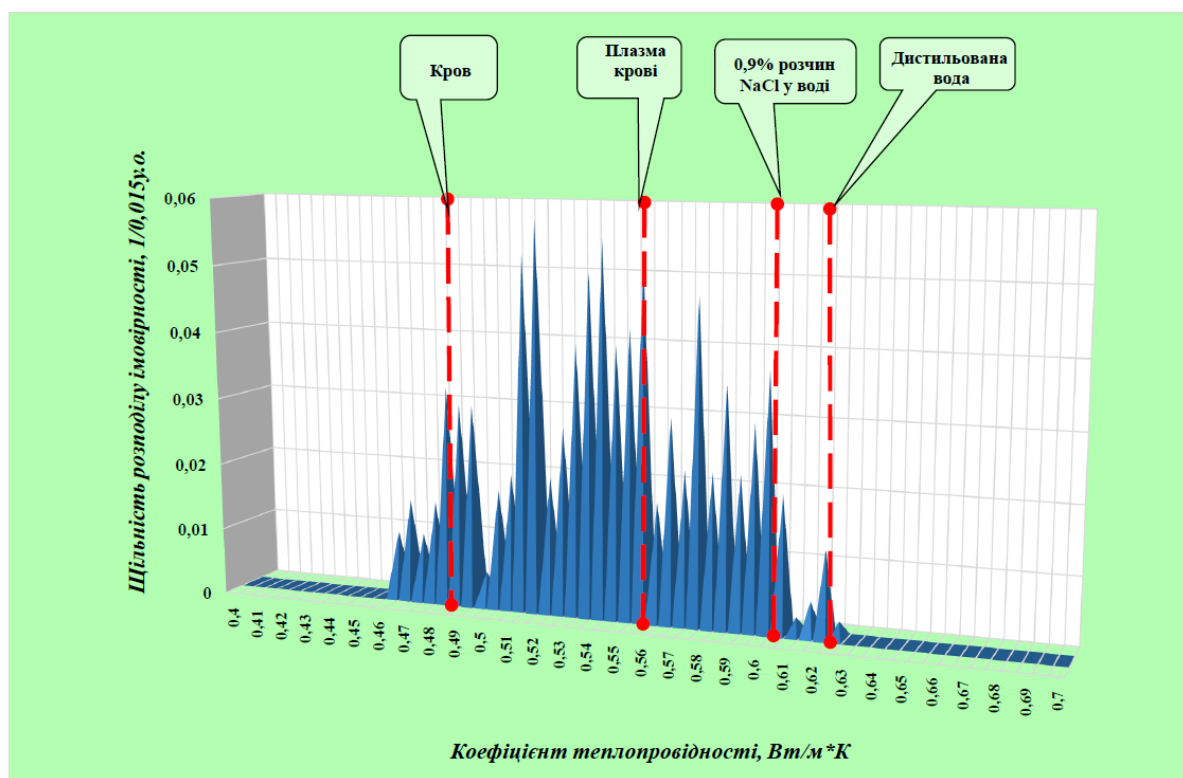


Рис. Г.2. Діаграма щільності імовірності значень в випадку розшарування суміші кров+алерген в об'ємі 170 мкл.

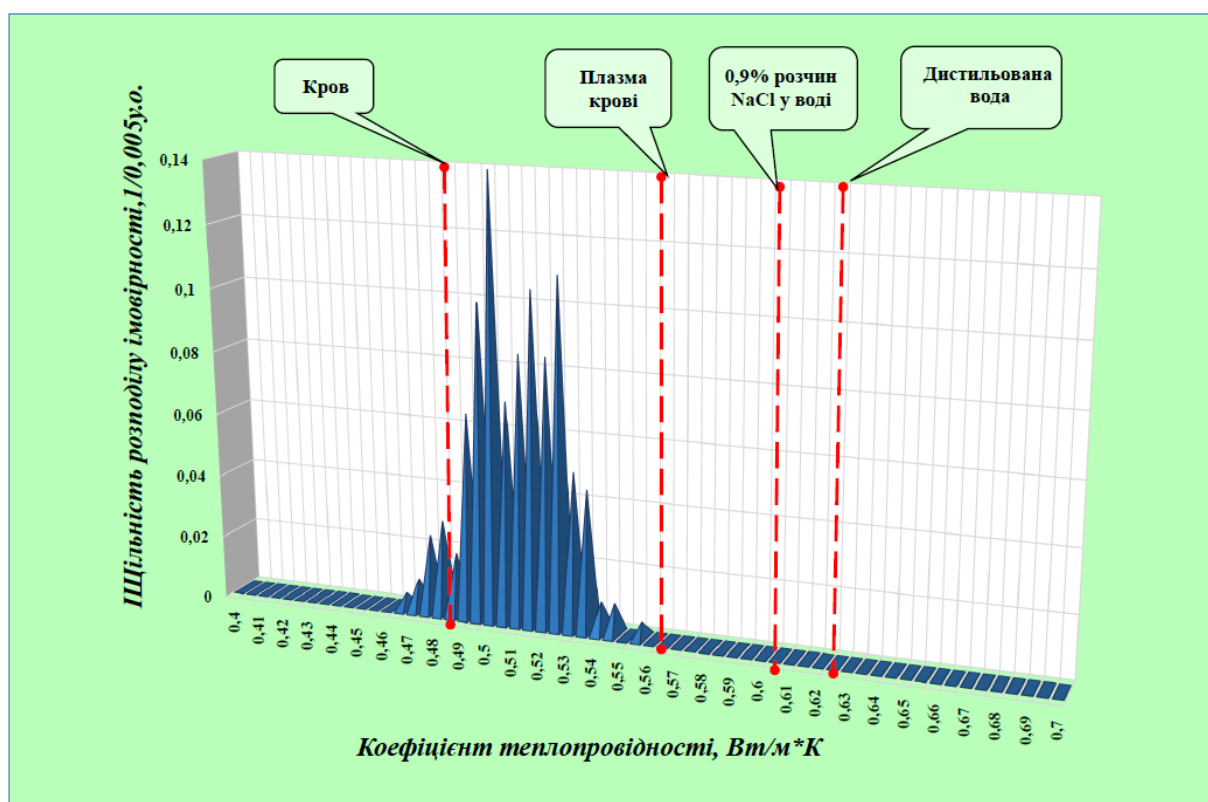


Рис. Г.3. Діаграма значень коефіцієнта теплопровідності сумішей кров+алерген в об'ємі 350 мкл.

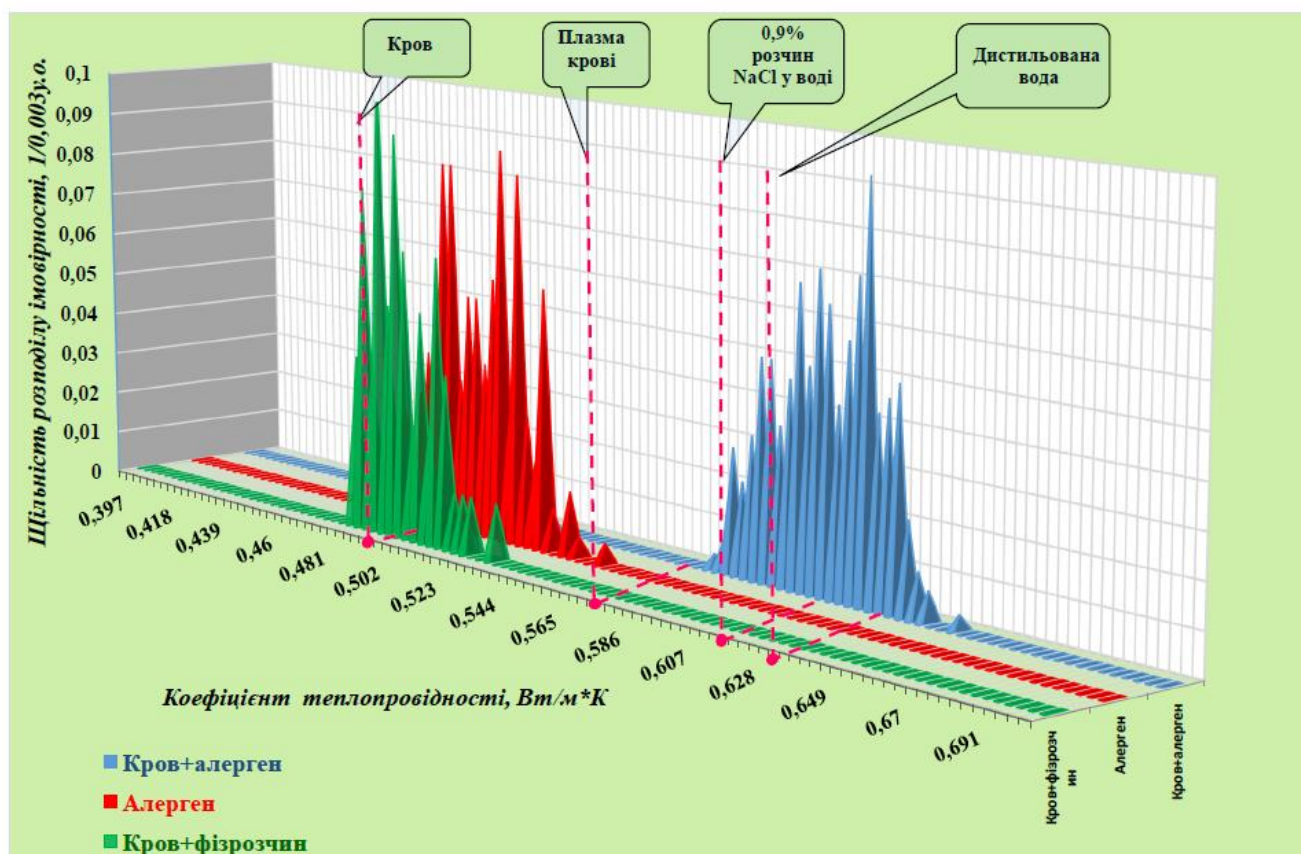


Рис. Г.4. Діаграма щільності імовірності значень коефіцієнта теплопровідності сумішей кров+алерген (червона діаграма), кров+фізрозчин (зелена діаграма) та різних алергенів в об'ємі 350 мкл.



Рис. Г.5. Загальний вигляд вимірювального блоку експериментальної установки.



Рис. Г.6. Загальний вигляд блоку зондів.



Рис. Г.7. Загальний вигляд термоелектричного нагрівача/охолоджувача.

Таблиця Г.1. Числові значення коефіцієнта теплопровідності різних сумішей, що одержані при проведенні тестування в порівнянні з даними інших дослідників та довідковими даними.

| Об'єм Досліджувана суміш | Коефіцієнт теплопровідності | | | |
|---|-----------------------------------|---|--------------------------------------|----------------|
| | Середнє значення, Вт/(м* К) | Середньоквадратичне відхилення, Вт/(м* К) | Середньоквадратичне відхилення, % | Примітка |
| 170 мкл. Дистильована вода* | 0,629 | 0,0069 | 1,09 | 0,628 [13] |
| 170 мкл. Фізіологічний розчин* (розчин 0,9% NaCl в воді) | 0,610 | 0,010 | 1,65 | [99, 100] |
| Кров** | 0,492±0,009 | | | [54, 129, 130] |
| Плазма крові** | 0,57±0,01 | | | [54, 129, 130] |
| 170 мкл. Кров+фізрозчин | 0,544 | 0,027 | 5,00 | |
| 170 мкл. Кров+алергени | 0,549 | 0,027 | 4,93 | |
| 350 мкл. Кров+фізрозчин (40% цитрату натрію) | 0,499 | 0,011 | 2,27 | |
| 350 мкл. Кров+фізрозчин (30% цитрату натрію) | 0,452 | 0,012 | 2,72 | |
| 350 мкл. Кров+алергени (40% цитрату натрію) | 0,505 | 0,017 | 3,32 | |
| 350 мкл. Кров+алергени (30% цитрату натрію) | 0,450 | 0,015 | 3,22 | |
| 350 мкл. *** Кров+алерген (полуниця) | 0,499 | 0,010 | 2,00 | |
| 350 мкл. *** Кров+алерген (диня) | 0,507 | 0,011 | 2,09 | |

| | | | | |
|---|-------|-------|------|----------------------------------|
| 350 мкл. *** Кров+алерген (смородина) | 0,469 | 0,011 | 2,24 | |
| 350 мкл. *** Кров+алерген (вишня) | 0,499 | 0,010 | 1,99 | |
| 350 мкл. *** Кров+алерген (ківі) | 0,499 | 0,011 | 2,13 | |
| 350 мкл. *** Кров+алерген (креветки чорноморські) | 0,514 | 0,016 | 3,19 | Виражена алергічна реакція |
| 350 мкл. *** Кров+алерген (кава чорна) | 0,521 | 0,013 | 2,51 | Помірна алергічна реакція |
| 350 мкл. *** Плазма крові +алергени | 0,543 | 0,017 | 3,11 | |
| 350 мкл. Алергени**** | 0,605 | 0,017 | 2,7 | |

* – за даними калібрувальних досліджень, даними вимірювання еталонних рідин з відомими ТФХ та даними довідників [13, 99, 100];

** – за даними вимірювань інших дослідників [55, 129, 130];

*** – за даними вимірювань крові 5-ти донорів;

**** – за даними вимірювань 30-ти різних алергенів.

Таблиця Г.2. Результати вимірювання за один цикл дослідження.

| Час від початку імпульсу, сек. | Зонд №1 Значення на виході АЦП, у. о. | Зонд №2 Значення на виході АЦП, у. о. | Зонд №3 Значення на виході АЦП, у. о. | Зонд №4 Значення на виході АЦП, у. о. |
|---|---|---|---|---|
| 0,15 | 2256,00 | 2270,00 | 2272,00 | 1990,00 |
| 0,3 | 2510,00 | 2526,50 | 2526,00 | 2062,00 |
| 0,45 | 2646,50 | 2670,00 | 2662,00 | 2102,00 |
| 0,6 | 2742,00 | 2758,50 | 2751,00 | 2127,50 |
| 0,75 | 2808,00 | 2824,25 | 2822,00 | 2150,00 |
| 0,9 | 2864,00 | 2880,50 | 2870,75 | 2166,00 |
| 1,05 | 2910,00 | 2926,00 | 2910,00 | 2174,00 |
| 1,2 | 2943,00 | 2966,50 | 2946,25 | 2184,00 |
| 1,35 | 2982,00 | 2998,00 | 2976,00 | 2192,50 |
| 1,50 | 3007,00 | 3025,00 | 3006,00 | 2201,00 |
| 1,65 | 3034,00 | 3054,50 | 3030,25 | 2208,00 |
| 1,8 | 3062,00 | 3078,00 | 3054,00 | 2215,00 |
| 1,95 | 3080,00 | 3102,00 | 3078,00 | 2222,00 |
| 2,1 | 3102,00 | 3118,00 | 3094,00 | 2230,00 |
| 2,25 | 3121,00 | 3136,00 | 3115,50 | 2233,00 |
| 2,4 | 3142,00 | 3155,25 | 3134,00 | 2238,00 |
| 2,55 | 3158,00 | 3174,00 | 3150,00 | 2246,00 |
| 2,7 | 3174,00 | 3190,00 | 3166,50 | 2248,00 |
| 2,85 | 3190,25 | 3200,75 | 3182,00 | 2254,00 |
| 3,0 | 3206,00 | 3214,00 | 3198,00 | 2256,00 |
| 3,15 | 3222,00 | 3230,00 | 3214,00 | 2262,00 |

| | | | | |
|------|---------|---------|---------|---------|
| 3,3 | 3238,00 | 3240,00 | 3224,00 | 2264,00 |
| 3,45 | 3254,00 | 3254,25 | 3240,50 | 2269,50 |
| 3,6 | 3264,00 | 3264,00 | 3254,00 | 2272,00 |
| 3,75 | 3280,00 | 3278,00 | 3270,75 | 2278,00 |
| 3,9 | 3294,00 | 3287,50 | 3280,00 | 2278,00 |
| 4,05 | 3310,00 | 3302,00 | 3294,75 | 2282,25 |
| 4,2 | 3319,00 | 3310,00 | 3305,00 | 2281,00 |
| 4,35 | 3329,00 | 3320,00 | 3318,00 | 2288,00 |
| 4,5 | 3344,00 | 3328,00 | 3334,00 | 2294,00 |
| 4,65 | 3358,00 | 3342,00 | 3342,00 | 2295,50 |
| 4,8 | 3367,25 | 3350,00 | 3358,00 | 2302,00 |
| 4,95 | 3382,00 | 3358,00 | 3367,00 | 2302,75 |
| 5,1 | 3391,00 | 3368,00 | 3376,00 | 2304,00 |
| 5,25 | 3406,00 | 3376,25 | 3390,50 | 2310,00 |
| 5,4 | 3414,00 | 3390,00 | 3398,75 | 2310,00 |
| 5,55 | 3424,00 | 3393,75 | 3408,00 | 2312,00 |
| 5,7 | 3438,00 | 3406,00 | 3422,00 | 2318,00 |
| 5,85 | 3446,00 | 3414,00 | 3430,00 | 2318,00 |
| 6,0 | 3455,00 | 3422,00 | 3438,25 | 2326,00 |

Таблиця Г.3. Теплові та електричні характеристики матеріалів вимірювального зонду при визначенні теплопровідності в різних їх діапазонах.

| Характеристика | Значення | | | Примітка |
|---|----------------|-----------------|---------------|--|
| Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м*К | від 0,1 до 1,0 | від 1,0 до 10,0 | від 10 до 100 | |
| Товщина стінки капсули, не більше, мм | 0,5 | 0,5 | 0,5 | |
| Коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплоізоляційного ковпачка, не більше, Вт/м*К | 0,05 | 0,1 | 0,2 | |
| Опір термістора при +25 °С, Ом | 2000 | 2000 | 2000 | |
| Потужність термістора, не менше, мВт | 30 | 50 | 100 | |
| Амплітуда імпульсу, не менше, В | 12 | 24 | 48 | На вимірювальному мосту |
| Тривалість імпульсу, не менше, сек. | 10 | 16 | 24 | При τ термістора не більше 7 сек. |
| Тривалість паузи охолодження, сек. | 30 | 50 | 100 | При τ термістора не більше 7 сек. |

Додаток Д

Текст програми роботи мікроконтролера

```

-----
// Function PROTOTYPES

void Init(void);
void Timer_Init(void);
void UART_Init(void);
void Port_IO_Init(void);
void Oscillator_Init(void);

void delay50ms(void);
void delay45mks(void);
void delay10mks(void);
void delay1ms(void);
void delay(unsigned int time);

void word_send (int wts);
void uword_send (unsigned int wts);
void send_float (float mfl);

void OutData(void);
void InitBoards(void);
void Measurements(void);
void GetDataFromBoard(void);
void ClearFlash(void);
void PreReadData(void);

void disp_on (void);
void disp_off (void);
void disp_clear (void);
void SET_DDRAM (unsigned char A_DDRAM);
void SET_CGRAM (unsigned char A_CGRAM);
void out_data (unsigned char DATA_RW);
void disp_shift (void);
void LCD_init (void);

void ShowWait(void);
void ShowDeviceReady(void);
void ShowTest(void);
void ShowProcessing(void);

//-----
// Global CONSTANTS & VARIABLES

sbit TXRXDATA = P4^4;
sbit ENDATA = P4^2;
sbit CLK = P1^0;
sbit sA = P4^7;
sbit sB = P4^6;
sbit sC = P4^5;

sbit LCD_E = P6^1;
sbit LCD_RS = P6^0;
sbit LCD_RW = P6^2;

sbit command0 = P1^7;
sbit command1 = P1^6;
sbit command2 = P1^5;
sbit command3 = P1^4;

//define DATAPORT P2

//xdata float MesData[6][20][10];
float chan[10];
xdata float ArrayToTransmit[5][20][10];
unsigned int ks = 0;
unsigned char boards = 0, NumberOfBoards = 0;
unsigned char board[6];
int BoardNo, SampleNo, MesNo;
//unsigned char temp1, temp2, temp3, temp4, temp5, temp6;

//-----

main()
{
    unsigned char command = 0;
    int i, n=100, dwBoards; //BoardNo, SampleNo,
    MesNo;
    unsigned int temp, k;

    Init();

    LCD_init();

    disp_on();
    disp_clear();
    ShowWait();

    SFRPAGE = CONFIG_PAGE;
    P1 &= 0xFE;           //CLK = 0;
    P4 |= 0x10;           //TXRXDATA = 1 don't
    change!!!
    P4 &= 0xFB;           //ENDATA = 0;
    P2 = 0xFF;           //P2 is used as an input

    delay(300);

    /*
    while(1) {
        for(k = 0; i < 100; k++) serv0 = ~ serv0;
        CLK = ~CLK;
    }
    */

    for(i=0; i<10; i++) chan[i] = 1;           //-12.5;
    for(i=0; i<6; i++) board[i] = 0;
    SampleNo = 1;
    MesNo = 1;

    WaitInit:

    InitBoards();

    //This part of code may be deleted//
    BoardNo = 0;
    for(i = 5; i >= 0; i--) {
        if(board[i] == 1) BoardNo = i + 1;
    }

    SFRPAGE = UART0_PAGE;
    dwBoards = (int) boards;
    temp = INIT_COMMAND * 256 + boards;

    ShowDeviceReady();

    //Wait for init command
    SFRPAGE = UART0_PAGE;
    R10 = 0;

```

```

while(RI0 == 0);
command = SBUF0;
if(command == INIT_COMMAND) {
    //word_send(INIT_COMMAND);
    //word_send(dwBoards);
    word_send(temp);
}
else goto WaitInit;

ks = 0;

// Waiting for a next command
WaitNext:

    ClearFlash();
    ShowDeviceReady();

    SFRPAGE = UART0_PAGE;
    RI0 = 0;

    while(RI0 == 0);
    command = SBUF0;

    if(command == DISCONNECT_COMMAND) {
        word_send(DISCONNECT_COMMAND);
        ks = 0;
        goto WaitInit;
    }

    if(command != START_COMMAND) goto
WaitNext;
    RI0 = 0;
    command = 0;

    //ClearFlash();
    ShowTest();

    SFRPAGE = UART0_PAGE;

    //Heat up sonds before measurements started
    P1 = 0x50;
    delay(10);
    P1 = 0x51;
    delay(10);
    P1 = 0x40;

    for(k = 0; k < 48000; k++) //50 seconds
    {
        delay1ms();

        if(RI0 != 0) {
            command = SBUF0;
            RI0 = 0;
            if(command ==
ENDINTERROGATION_COMMAND) {
                command = 0;
                ShowWait();
                delay(50000 - k +
5000);

                //ClearFlash();
                goto WaitNext;
            }
            if(command ==
DISCONNECT_COMMAND) {
                word_send(DISCONNECT_COMMAND);
                command = 0;
                ShowWait();
                delay(30000 -
k + 5000);

                //ClearFlash();
                ks = 0;
                for(i=0; i<10;
i++) chan[i] = 1;

                goto WaitInit;
            }
            if(command ==
REQUEST_DATA) {
                command = 0;

                word_send(DATA_NOT_READY);
                ks = 0;

                }
                if(k == 15000) P1 = 0x40;
                //CLK = 0 + command to start measurements
            }
        }
    }
}

```

```

}

//Pre-read data from flash
//PreReadData();
//SFRPAGE = CONFIG_PAGE;
//GetDataFromBoard();

ShowProcessing();

SFRPAGE = UART0_PAGE;
while(RI0 == 0);
command = SBUF0;
RI0 = 0;

if(command == REQUEST_DATA) {
    command = 0;
    word_send(DATA_READY);
    ks = 0;
}
else {
    if(command ==
ENDINTERROGATION_COMMAND) {
        command = 0;
        SampleNo = 1;
        MesNo = 1;
        BoardNo = 1;
        //ClearFlash();
        for(i=0; i<10; i++) chan[i] = 1;
        goto WaitNext;
    }
    if(command ==
DISCONNECT_COMMAND) {

        word_send(DISCONNECT_COMMAND);
        ks = 0;
        //ClearFlash();
        for(i=0; i<10; i++) chan[i] = 1;
        goto WaitInit;
    }
}

while(RI0 == 0);
command = SBUF0;
RI0 = 0;
command = 0;

for(BoardNo = 1; BoardNo < 7; BoardNo++) {
    if(board[BoardNo - 1] == 1) {
        //data are transmitted if the board exists
        for(SampleNo = 1; SampleNo <
21; SampleNo++) {
            for(MesNo = 1; MesNo
< 21; MesNo++) {

                GetDataFromBoard();

                SFRPAGE =
UART0_PAGE;

REPEAT:
                RI0 = 0;
                chan[0] =
(float) n;

                word_send(PREAMBULA);

                ks = 0;

                word_send(BoardNo);

word_send(SampleNo);

word_send(MesNo);

send_float(chan[0]);

for(i=1; i<10; i++) send_float(chan[i]);

uword_send(ks);

//for(i=0;
i<10; i++) chan[i]++;
//}
// 50 * 20 =
1000 bytes were transmitted = 1 array from 1 board

//if((SampleNo == 1) && (BoardNo == 1))
delay50ms();

//GetDataFromBoard();

n = 100;

PreReadData();

//SFRPAGE =
CONFIG_PAGE;

//GetDataFromBoard();

//SFRPAGE =
UART0_PAGE;

while(RI0 ==
0) {

    delay1ms();

n--;
    if(n
== 0) break;

}

if(RI0 != 0) {

    command = SBUF0;

    RI0
= 0;

    if(command == DATAERR) {

        //delay50ms();

        goto REPEAT;

    }

    if(command ==
ENDINTERROGATION_COMMAND) {

        command = 0;

        SampleNo = 1;

        MesNo = 1;

        BoardNo = 1;

```

```

//
ClearFlash();

for(i=0; i<10; i++) chan[i] = 0;

goto WaitNext;
}

if(command == DISCONNECT_COMMAND) {

word_send(DISCONNECT_COMMAND);

ks = 0;

//
ClearFlash();

for(i=0; i<10; i++) chan[i] = 0;

goto WaitInit;
}
}
else goto

REPEAT;

//for(i=1;i<10;i++) chan[i]++;

} //End of

"Mes" cycle
} //End of "if the board exists"
} //End of data transmission

//Values must be returned to the initial values before
//the next cycle of measurements is started

command = 0;
SampleNo = 1;
MesNo = 1;
BoardNo = 1;
for(i=0; i<10; i++) chan[i] = 0;
//
ClearFlash();

goto WaitNext;
}

void ShowWait(void)
{
SET_DDRAM(0);
disp_clear();
disp_shift();
out_data(0xAB); //И
disp_shift();
out_data(0x45); //Е
disp_shift();
out_data(0x4B); //К
disp_shift();
out_data(0x41); //А
disp_shift();
out_data(0xA6); //Ў
disp_shift();
out_data(0x54); //Т
disp_shift();
out_data(0x45); //Е
}

void ShowDeviceReady(void)
{
SET_DDRAM(0);
disp_clear();
disp_shift();
out_data(0xA8); //П
disp_shift();
out_data(0x70); //р
disp_shift();
out_data(0xB8); //и
disp_shift();
out_data(0x63); //с
disp_shift();
out_data(0xBF); //т
disp_shift();
out_data(0x70); //р
disp_shift();
out_data(0x69); //и
disp_shift();
out_data(0xB9); //й

SET_CGRAM(0);
disp_shift();
out_data(0xB4); //Г
disp_shift();
out_data(0x6F); //о
disp_shift();
out_data(0xBF); //т
disp_shift();
out_data(0x6F); //о
disp_shift();
out_data(0xB3); //в
disp_shift();
out_data(0xB8); //и
disp_shift();
out_data(0xB9); //й

}

void ShowTest(void)
{
SET_DDRAM(0);
disp_clear();
disp_shift();
out_data(0x20); //
disp_shift();
out_data(0x20); //
disp_shift();
out_data(0x54); //Т
disp_shift();
out_data(0x45); //Е
disp_shift();
out_data(0x43); //С
disp_shift();
out_data(0x54); //Т
}

void ShowProcessing(void)
{
SET_DDRAM(0);
disp_clear();
disp_shift();
out_data(0x4F); //О
disp_shift();
out_data(0xB2); //б
disp_shift();
out_data(0x70); //р
disp_shift();
out_data(0x6F); //о
disp_shift();
out_data(0xB2); //б
disp_shift();
}

```



```

    out_data(0xBA); //k
    disp_shift();
    out_data(0x61); //a

    SET_CGRAM(0);
    disp_shift();
    out_data(0xE3); //д
    disp_shift();
    out_data(0x61); //a
    disp_shift();
    out_data(0xBD); //н
    disp_shift();
    out_data(0xB8); //и
    disp_shift();
    out_data(0x78); //х
}

void Measurements(void)
{
}

void OutData(void)
{
}

void word_send (int wts)
{
    char *pchar;

    SFRPAGE = UART0_PAGE;
    pchar = (char *) &wts;
    TI0 = 0;
    SBUF0 = *pchar; //byte;
    while (TI0 != 1);
    ks += *pchar; //byte;

    TI0 = 0;
    SBUF0 = *(pchar + 1); //byte;
    while (TI0 != 1);
    ks += *(pchar + 1); //byte;
}

void uword_send (unsigned int wts)
{
    char *pchar;

    SFRPAGE = UART0_PAGE;
    pchar = (char *) &wts;
    TI0 = 0;
    SBUF0 = *pchar; //byte;
    while (TI0 != 1);

    TI0 = 0;
    SBUF0 = *(pchar + 1); //byte;
    while (TI0 != 1);
}

void send_float (float mfl)
{
    char i;
    char *pchar;

    SFRPAGE = UART0_PAGE;
    pchar = (char *) &mfl;

    for (i=0; i<4; i++) {
        TI0 = 0;
        SBUF0 = *(pchar + i);
        while (TI0 != 1);
        ks += *(pchar + i);
    }

    // Peripheral specific initialization functions,
    // Called from the Init_Device() function
    void Timer_Init()
    {
        SFRPAGE = TIMER01_PAGE;
        TCON = 0x40;
        TMOD = 0x20;
        CKCON = 0x10;
        TH1 = 0xE8;
    }

    void UART_Init()
    {
        SFRPAGE = UART0_PAGE;
        SCON0 = 0x50;
        SSTA0 = 0x10;
    }

    void Port_IO_Init()
    {
        SFRPAGE = CONFIG_PAGE;
        P0MDOUT = 0x01;
        P1MDOUT = 0xFF;
        P4MDOUT = 0xFE;
        P5MDOUT = 0xFF;
        P6MDOUT = 0x07;
        XBR0 = 0x04;
        XBR2 = 0xC0;
    }

    void disp_on (void)
    {
        SFRPAGE = CONFIG_PAGE;
        P6 &= 0xF8;
        _nop_();
        _nop_();
        LCD_E = 1;
        _nop_();
        _nop_();
        _nop_();
        _nop_();
        _nop_();
        _nop_();
        _nop_();
        P5 = 0x0C;
        _nop_();
        _nop_();
        _nop_();
        _nop_();
        _nop_();
        LCD_E = 0;
        delay45mks();
        delay45mks();
    }

    void disp_off (void)
    {

```

```

SFRPAGE = CONFIG_PAGE;
P6 &= 0xF8;
_nop_();
_nop_();
LCD_E = 1;
_nop_();
_nop_();
_nop_();
_nop_();
_nop_();
_nop_();
_nop_();
P5 = 0x08;
_nop_();
_nop_();
_nop_();
_nop_();
LCD_E = 0;
delay45mks();
delay45mks();
}

void out_data(unsigned char DATA_RW)
{
    SFRPAGE = CONFIG_PAGE;

    P6 &= 0xF8;
    LCD_RS = 1;
    LCD_RW = 0;
    _nop_();
    _nop_();
    LCD_E = 1;
    _nop_();
    _nop_();
    _nop_();
    _nop_();
    _nop_();

    _nop_();
    _nop_();
    P5 = 0x1C;
    _nop_();
    _nop_();
    _nop_();
    _nop_();
    LCD_E = 0;
    delay45mks();
    delay45mks();
}

_nop_();
_nop_();
P5 = DATA_RW;
_nop_();
_nop_();
_nop_();
_nop_();
_nop_();
LCD_E = 0;
delay45mks();
delay45mks();
}

void disp_shift (void)
{
    SFRPAGE = CONFIG_PAGE;

    P6 &= 0xF8;
    _nop_();
    _nop_();
    LCD_E = 1;
    _nop_();
    _nop_();
    _nop_();
    _nop_();
    _nop_();
    _nop_();
    _nop_();
    P5 = 0x1C;
    _nop_();
    _nop_();
    _nop_();
    _nop_();
    LCD_E = 0;
    delay45mks();
    delay45mks();
}

```

Додаток Е

Акти впровадження



АКТ

про використання та впровадження результатів
дисертаційної роботи

Комісія у складі:

к.т.н., виконавчий директор – Гайдаманчук Віктор Авксентійович (Голова);
заст. директора – Кучма Наталія Мирославівна.

у період з 06 по 30 листопада 2017 р. розглянула дисертацію Матвієнка С. М. та публікації автора за матеріалами дисертаційної роботи на тему: **«Вдосконалення методу визначення складу речовин за їх теплопровідністю»**, яка виконувалась на кафедрі виробництва приладів приладобудівного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Комісія встановила, що окремі наукові результати, які викладені у вищеназваній дисертаційній роботі та публікаціях автора, були використані в дослідницькій та виробничій діяльності ТОВ «ВІРКОМ» (Товариство з обмеженою відповідальністю «ВІРКОМ») в забезпечення виконання наступних договорів:

- Договір № 800221-1362-1362 від 22.07.2015 р. з ПАТ «Укртелеком»;
- Договір № 1804-14 від 18.04.2014 р. з ПАТ «Укртрансфаста».

До таких результатів належить:

1) Результати досліджень, алгоритмічні, схемо-технічні та конструктивно-технологічні рішення зменшення похибки вимірювання при розробці рекомендацій щодо проектування систем оперативного дистанційного контролю за станом конструкцій елементів обладнання, які встановлені зовні приміщень, на основі аналізу теплофізичних характеристик елементів будівельних споруд тепло- та гідроізоляційних матеріалів, трубопроводів та телекомунікаційних мереж;

2) Розроблений вимірювальний блок експериментальної установки для вимірювання теплофізичних характеристик твердих матеріалів та розроблене програмне забезпечення "Analyser2015" для дослідження стану обладнання мережі синхронізації, зокрема для визначення температури та вологості тепло- гідроізоляції і конструкцій елементів обладнання, які встановлені зовні приміщень за їх теплофізичними характеристиками;

3) Розроблені методики та правила калібрування пристроїв при вимірюванні теплофізичних характеристик елементів споруд, тепло- гідроізоляційних матеріалів телекомунікаційних мереж.

Використання результатів є важливим для ефективного контролю та моніторингу стану елементів обладнання телекомунікаційних мереж, що дозволяє своєчасно проводити профілактичні роботи із запобігання швидкого старіння обладнання та позитивно позначається на надійності та ефективності функціонування і експлуатації телекомунікаційних мереж.

Голова комісії

Гайдаманчук В. А.

Член комісії

Кучма Н. М.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан приладобудівного факультету
Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
д.т.н., професор

Г.С. Тимчик

“12” 09 2018 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи завідуючого лабораторії кафедри виробництва
приладів приладобудівного факультету Матвієнка С.М.
у навчальний процес КПП ім. Ігоря Сікорського

Ми, що нижче підписалися, заступник декана з наукової роботи ПБФ В.І. Микитенко, голова методичної комісії ПБФ М.В. Філіппова, в.о. завідувача кафедри виробництва приладів В.В. Шевченко склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою кандидатської дисертаційної роботи Матвієнка Сергія Миколайовича «Вдосконалення методу визначення складу речовин за їх теплопровідністю» використовуються у навчальному процесі приладобудівного факультету КПП ім. Ігоря Сікорського на кафедрі виробництва приладів.

| Найменування впровадженого результату | Форма впровадження та досягнутий фактичний ефект |
|--|---|
| 1. Вдосконалений метод визначення складу речовин з застосування термістора, що враховує умови розповсюдження теплової енергії від чутливого елемента, вкритого захисною оболонкою. | Вдосконалений метод визначення складу речовин при вимірюванні їх ТФХ впроваджено у вигляді практичних та лабораторних робіт для дисципліни «Матеріалознавство» студентами спеціальностей «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» і «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». |
| 2. Експериментальна установка для визначення та контролю теплофізичних характеристик матеріалів. | Створена експериментальна установка дозволяє визначати теплопровідність матеріалів та здійснювати ефективний контроль їх теплофізичних характеристик, а також виконувати обробку результатів при одночасному вимірюванні великої кількості досліджуваних зразків з заданою точністю. |

Заступник декана ПБФ з наукової роботи,
к.т.н., доцент

В.І. Микитенко

Голова методичної комісії ПБФ,
к.т.н., доцент

М.В. Філіппова

В.о. завідувача кафедри виробництва приладів,
к.т.н., доцент

В.В. Шевченко



Затверджую
Генеральний директор
ПП "УКРТЕХМЕД"

ТАВОКІН В. В.

09 2018 р.

АКТ

про використання та впровадження результатів
дисертаційної роботи

Даним актом представники ПП "УКРТЕХМЕД" в особах заступника директора ПП "УКРТЕХМЕД" Ковальчука В.В., та інженера-технолога Кірієнко І.Л. ПП "УКРТЕХМЕД" засвідчуємо, що окремі наукові результати дисертаційної роботи Матвієнка Сергія Миколайовича на тему: «Вдосконалення методу визначення складу речовин за їх теплопровідністю», яка виконувалась на кафедрі виробництва приладів приладобудівного факультету НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» були використані в дослідницькій та виробничій діяльності ПП "УКРТЕХМЕД" (Приватне підприємство "УКРТЕХМЕД") при розробці рекомендацій з удосконалення технології виробництва стерильних медичних гідрогелевих пов'язок «АРМА-ГЕЛЬ+», а саме:

- Результати досліджень, алгоритмічні та технічні рішення зменшення похибки вимірювання теплофізичних характеристик на основі їх аналізу для ефективного контролю технологічного процесу приготування гелеутворюючої композиції та створенні гелевої пластини при виготовленні гідрогелевих пов'язок «АРМА-ГЕЛЬ+»;
- Розроблений вимірювальний блок приладу для вимірювання теплофізичних характеристик речовин та програмне забезпечення, створених в ході дисертаційної роботи, використано для дослідження та контролю технології зшивання сітки, виготовленої з поліпропіленових волокон та гелеутворюючої композиції протягом 14-15 годин при температурі 75-85°C при формуванні гідрогелевої пластини для контролю температурного режиму та процесу формування біосумісних синтетичних полімерів за їх характеристиками;
- Використано запропонований в дисертаційній роботі метод визначення концентрації пропонованих складових компонентів гелеутворюючої композиції, завдяки якому є можливість корегування часу гелеутворення, підвищення його здатності для насичування лікарськими речовинами і зменшення вірогідності прилипання гідрогелевої композиції до стінок реактора.

Використання результатів є важливим для ефективного контролю та моніторингу технологічного процесу виготовлення гідрогелевих пластин, що дозволяє удосконалити технологію виготовлення гідрогелевих пов'язок «АРМА-ГЕЛЬ+» та підвищити їх якість.

Заступник директора ПП "УКРТЕХМЕД"

В.В. Ковальчук

Інженер-технолог ПП "УКРТЕХМЕД"

І.Л. Кірієнко

Додаток Ж

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Matvienko S., Vysloukh S., Martynchyk O. Determination thermal and physical characteristics of liquids using pulse heating thermistor method. *International Journal of Engineering Research and Science*. 2016. Vol.2, Iss. 5. P.250-258; ISSN №2395-6992. (іноземне видання). Здобувачем досліджено можливість використання методу прямого підігріву термістора для вимірювання ТФХ рідин та твердих матеріалів.
2. Matvienko S., Vysloukh S., Martynchyk O. Increasing accuracy of measuring thermal conductivity of liquids by using the direct heating thermistor method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 4, No.5(82). P. 20-30. DOI : 10.15587/1729-4061.2016.75459. (Scopus). Здобувачем розроблено математичну модель розповсюдження теплової енергії від термістора при його розігріві та запропоновано функціональну та електричну схеми приладу для вимірювання теплопровідності речовин.
3. Матвієнко С.М., Вислоух С.П Підвищення точності вимірювання теплопровідності рідин методом прямого підігріву термістора. *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. 2016. № 6. С. 85–93. (DOAJ, Index Copernicus). Здобувачем здійснено аналіз причин виникнення похибки вимірювання та можливості підвищення точності вимірювання ТФХ речовин методом прямого підігріву термістора.
4. Матвієнко С.М., Вислоух С.П., Філоненко К.Г. Вимірювання теплопровідності твердих матеріалів методом прямого підігріву термістора. *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. 2017. № 2. С. 97–107. (DOAJ, Index Copernicus). Здобувачем розроблено експериментальну установку для вимірювання теплопровідності твердих матеріалів методом імпульсного розігріву термістора.
5. Матвієнко С. М., Тимчик Г. С., Терещенко М. Ф., Матвієнко А. М. Вплив процесів конвекції в рідині на похибку вимірювання теплопровідності методом прямого підігріву термістора. *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. 2017. № 5. С. 110–122.

(DOAJ, Index Copernicus). Здобувачем досліджено вплив процесів конвекції в досліджуваній речовині на похибку вимірювання теплопровідності методом прямого підігріву термістора та обґрунтовано вибір оптимальної конструкції датчика.

6. Тимчик Г. С., Вислоух С. П., Матвієнко С. М. Контроль складу речовин за допомогою «методу теплопровідності». *Перспективні технології та прилади*. 2018. № 12. С. 157–163. Здобувачем підтверджена можливість контролю вмісту неоднорідних речовин, а саме при випаданні осаду або розшиаруванні досліджуваної суміші.

7. Патент України на винахід №113044, Пристрій та спосіб реєстрації теплових процесів у біологічних пробах / Мартинчук О.А.; Матвієнко С. М.; Вислоух С.П.; Заявник и власник Мартинчук О.А.; Матвієнко С. М.; Вислоух С.П. – опубл. 25.11.2016, Бюл.№ 22/2016. Здобувачем запропоновано конструктивні особливості приладу для здійснення реєстрації теплових процесів у біологічних пробах та визначення ступеня імунологічної реакції за ТФХ сумішей біологічних проб та алергенів.

8. Патент на корисну модель України №119756, G01N 25/18 (2006.01) Пристрій для вимірювання коефіцієнта теплопровідності різноманітних речовин / Матвієнко С.М., Вислоух С.П., Терещенко М.Ф., Матвієнко А.М.; заявл. 29.03.2017, опубл. 10. 10. 2017, Бюл. №19 /2017

9. Матвієнко С. М., Філіппова М. В., Мартинчук О. А. Дослідження теплопровідності матеріалів за допомогою методу імпульсної термістометрії. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2015. Вип.6(95). С. 106-112. *(Index Copernicus)*. Здобувачем здійснено аналіз сучасних методів та пристроїв дослідження ТФХ речовин.

10. Филиппова М.В., Матвиенко С.Н. К вопросу разработки системы измерения теплопроводности методом импульсной термистометрии. *Приборостроение – 2014: материалы VII Международной научно-технической конференции (г.Минск, 19-21 ноября 2014 г.)*. Минск: БНТУ, 2014. С. 110-111.

11. Матвиенко С.Н., Филиппова М.В. Вимірювання теплопровідності рідин та матеріалів методом імпульсного підігріву термістора. Погляд у майбутнє приладобудування: збірник тез доповідей VII науково-практичної конференції студентів та аспірантів (м. Київ, 22-23 квітня 2015 р.). Київ: НТУУ «КПІ», 2015. С. 52.

12. Філіппова М.В., Матвієнко С.М. Експериментальна установка для вимірювання теплопровідності. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 14 Міжнародної науково-технічної конференції. (м. Київ, 22-23 квітня 2015 р.). Київ: НТТУ «КПІ», 2015. С. 78-79.

13. Матвиенко С. Н., Вислоух С. П. Исследование методов измерения теплопроводности с использованием термисторов. Новые направления развития приборостроения: материалы 8-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (г. Минск, 22-24 апреля 2015 г.) Минск: БНТУ, 2015. С. 285.

14. Матвиенко С.Н. , Вислоух С.П., Матвиенко А.Н. Экспериментальная установка для измерения теплопроводности твердых материалов. Современная наука и образование: материалы II Всероссийской научно-практической конференции (Новосибирск, 14 января 2016 г.). Новосибирск: ООО «ЦСРНИ», 2016. С. 44-49.

15. Матвиенко С. Н., Вислоух С. П. Конструктивные особенности экспериментальной установки для измерения теплопроводности крови. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 15-тої Міжнародної науково-технічна конференції (м. Київ, 17-18 травня 2016 р.). Київ: НТТУ «КПІ», 2016. С. 122-123.

16. Матвиенко С. Н., Вислоух С. П. Возможность определения теплофизических свойств жидкостей и материалов методом термистометрии. Новые направления развития приборостроения: сборник тезисов докладов 9-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (г. Минск, 20-21 апреля 2016 г.). Минск: БНТУ, 2016. С. 117.

17. Матвиенко С. Н., Выслоух С. П. Программный комплекс обработки результатов исследований измерения теплопроводности жидкостей и материалов методом термистометрии. Информатика, Математика, Автоматика. ИМА: 2016: материалы научно-технической конференции (м. Суми, 18–22 квітня 2016 р.). Суми. 2016. С. 206.

18. Матвиенко С.Н., Выслоух С.П. Оптимизация процесса измерения теплопроводности методом импульсного подогрева термистора. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 15-тої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 17-18 травня 2016 р.). Київ: НТТУ «КПІ», 2016. С. 65.

19. Матвієнко С. М., Матвієнко А. М. Вимірювання коефіцієнта теплопровідності крові пацієнтів методом прямого підігріву термистора. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 16-тої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 16-17 травня 2017 р.). Київ: НТТУ «КПІ імені І. Сікорського», 2017. С. 112 – 113.

20. Матвієнко С. М., Вислоух С. П. Вимірювання коефіцієнта теплопровідності нанорідин методом прямого підігріву термистора. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 16-тої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 16-17 травня 2017 р.). Київ: НТТУ «КПІ імені І. Сікорського», 2017. С. 62–63.

21. Матвиенко С. Н., Матвиенко А. М., Терещенко Н. Ф. Исследование теплопроводности неоднородных биологических растворов методом прямого разогрева термистора. Приборостроение – 2017: материалы X Международной научно-технической конференции (г. Минск, 1-3 ноября 2017г.). Минск: БНТУ, 2017. С. 50 – 51.

22. Матвієнко С. М., Матвієнко А. М. Підготовка зразків при дослідженні теплофізичних характеристик біологічних речовин. Приладобудування: стан і перспективи: збірник тез доповідей 17-тої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 15-16 травня 2018 р.). Київ: НТТУ «КПІ імені І. Сікорського», 2018. С. 114–115.

23. Tymchik G., Vysloukh S., Tereshchenko N., Matvienko S. Investigation thermal conductivity of biological materials by direct heating hermistor method. 2018 IEEE 38th International Conference on ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY (ELNANO) (Kyiv, 24.04.2018). Kyiv, 2018. P. 429-434.

Апробація результатів дисертаційного дослідження: Основні положення та результати дисертаційної роботи були висвітлені на: VII Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2014», г.Минск, 2014г.; X Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2017», г.Минск, 2017 г.; 8-ой, 9-ой Международной научно - технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения», г.Минск, 2015, 2016 гг.; Науково-технічній конференції «Інформатика, Математика, Автоматика. ІМА :2016», Суми, 2016р.; VIII та X науково-практичній конференції студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування». м. Київ, 2015, 2017 рр.; 14-й, 15-й, 16-й та 17-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Приладобудування: стан і перспективи», м. Київ, 2015, 2016, 2017, 2018 рр.. 38th International Conference on ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY (ELNANO), IEEE, Kyiv, Ukraine, 2018.